

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Měření barevných souřadnic LED diod používaných v  
automobilovém vnějším osvětlení**

**Measurement of Colors Coordinates of LEDs Used in the  
Automotive Exterior Lighting**

**2013**

**Bc. Patrik Hanulák**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Patrik Hanulák**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: Měření barevných souřadnic LED diod používaných v automobilovém  
vnějším osvětlení  
Measurement of Colors Coordinates of LEDs Used in the Automotive  
Exterior Lighting

### Zásady pro vypracování:

Technologický rozvoj v automobilovém průmyslu se projevuje i na postupné změně principu osvětlení. Snaha o úsporu a efektivní využití energie vede automobilky ke změně využití současných světelných zdrojů. Dochází k postupnému nahrazení klasických žárovek za energeticky efektivní LED diody. Pomocí LED diod je možné světlo navést do různých stylisticky zajímavých tvarů svítidel, lze jimi dosáhnout výrazně lepší homogenity světla. Výrobci dodávají LED diody v tzv. „colorbinech“ a v závislosti na výrobcích, nemají všechny LED diody stejné barevné souřadnice. Pro daný výrobek je nutné stanovit, který „colorbin“, případně kolik „colorbinů“ uvažovaných LED diod je možné použít. To může být dáno přáním automobilky mít studené, nebo naopak teplé světlo, nebo sjednotit barvu světelné funkce, kde jsou LED diody využity se světelnou funkcí se žárovkou nebo výbojkou, např. tlumené světlo svítící současně s LED předním obrysovým světlem.

Úkolem diplomové práce je proměřit dodané LED diody v integračních koulích, proměřit spektrální charakteristiky LED diod a následně měření vyhodnotit.

1. Popište funkci polovodičových přechodů užitých v LED diodách určených pro automobilový průmysl.
2. Popište princip teorie kolorimetrického měření. Vyznačte oblast v kolorimetrickém trojúhelníku barev definující barvu bílého světla dané zákonným předpisem pro vnější automobilové osvětlení.
3. Proměřte zadané LED diody v integrační kouli v laboratoři Varroc Automotive Systems s.r.o. Výsledky měření, které integrační koule poskytuje v textovém formátu převedte do software, jenž je zpracuje ve formě maker, které naměřené souřadnice LED diod umístí do grafu reprezentujícího kolorimetrický trojúhelník barev.
4. Proveďte kontrolní měření zadaných LED diod v jiné integrační kouli mimo Varroc Automotive Systems s.r.o.
5. Změřte spektrální charakteristiky zadaných LED diod na zařízení mimo Varroc Automotive Systems s.r.o.
6. Zhodnot'te měření v integračních koulích a spektrometrické měření, srovnajte měření zadaných LED diod na integrační kouli ve Varroc Automotive Systems s.r.o. a na jiném zařízení a všechny výsledky srovnajte s protokoly LED diod dodané dodavatel LED diod. Na základě srovnání výsledků měření doporučte vhodné nastavení vstupních parametrů software řídící integrační kouli ve Varroc Automotive Systems s.r.o.

### Seznam doporučené odborné literatury:

[1] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Marek BÁLSKÝ, Zdeněk BLÁHA, Zbyněk CARBOL, Daniel DIVIŠ, Blahoslav SOCHA, Jaroslav ŠNOBL, Jan ŠUMPICH a Petr ZÁVADA. *Světelná technika*. Vyd. 1.

Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.

[2] BAXANT, P. Zdroje LED v osvětlovací technice. Electro, 2011, roč. 21, č. 5, s. 6-9. ISSN: 1210- 0889

[3] HALLIDAY, D, RESNICK, R, WALKER, J. Fyzika. 1997. vyd.: VUTIAM,  
2001. 1254 s. ISBN 80-214-1868-0.

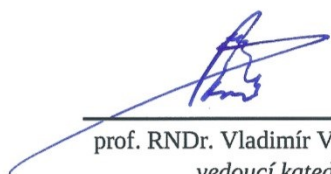
[4] SCHUBERT, E. Fred . Light-Emitting Diodes. 2003. vyd.:Cambridge University Press, 432 s. ISBN  
978-0-521-86538-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky  
pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

Dňa: 2.5.2012



podpis študenta

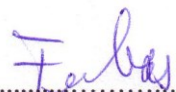
## **Pod'akovanie**

Rád by som poďakoval Ing. Janovi Látalovi za odbornú pomoc a konzultácie pri vytváraní tejto diplomovej práce. Ďalej by som chcel poďakovať Mgr. Janovi Martochovi, Mgr. Petrovi Ferbasovi a Ing. Františkovi Hanáčkovi zo spoločnosti Varroc Lighting Systems s.r.o za ich odborné rady a pomoc pri zaisťovaní súčiastok a informácií potrebných pri spracovaní tejto diplomovej práce. V neposlednom rade by som rád poďakoval Ing. Petrovi Marcalíkovi zo spoločnosti ELCOM a.s. za jeho pomoc pri spracovaní programu, ktorý je výstupom tejto diplomovej práce.

## **Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby**

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava.“

Dne: 2.5.2013

  
.....

podpis zástupce společnosti Varroc Lighting Systems

## **Abstrakt**

Diplomová práca sa zaoberá problematikou farebných koordinátov LED diód používaných vo vonkajšom automobilovom osvetlení. Ponúka prehľad o jednotlivých svetelných zdrojoch a porovnáva vlastnosti LED používaných v telekomunikáciách a automobilovom priemysle. Takisto poskytuje stručný náhľad o rôznych medzinárodných normách, ktoré pojednávajú osvetlení používanom vo vonkajšom automobilovom priemysle a navrhuje vlastné softwarové riešenie pri porovnávaní farebných binov LED a zjednodušuje tak výber, alebo nahradenie jedného farebného binu za iný. Zároveň overuje pravdivosť a presnosť dokumentácie k LED, ktorú poskytuje výrobca LED a porovnáva teoretické hodnoty s nameranými.

## **Kľúčové slová**

LED, LabVIEW, farebný bin, farebné súradnice, ECE, SAE, XML, P-N prechod, biele svetlo, zdroj svetla, spektrálna charakteristika

## **Abstract**

Diploma thesis deals with LED's color coordinates used in automotive exterior lighting. It offers quick overview on light sources and compares attributes of LEDs used for telecommunications and in automotive industry. There is also brief survey of international standards that deal about lighting used in exterior automotive lightings. Thesis brings software solution for comparing LEDs color bins that should simplify choosing or replacing one color bin for another. One part of the thesis verifies accuracy of datasheet's values and compares these theoretical values to real measured values.

## **Key words**

LED, LabVIEW, color bin, color coordinates, ECE, SAE, XML, P-N junction, white light, source of light, spectral characteristic



# Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>U</b>	V	Elektrické napätie
<b>I</b>	A	Elektrický prúd
<b>E</b>	J	Energia
<b>f</b>	Hz	Frekvencia
<b>T</b>	°C	Teplota
<b>R<math>\Theta</math>, R<sub>th</sub></b>	°C·W <sup>-1</sup>	Tepelný odpor
<b><math>\lambda</math></b>	nm	Vlnová dĺžka

## Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
<b>DBR</b>	Distributed Bragg reflector	Distribúovaný Braggov odrazáč
<b>DFB</b>	Distributed Feedback Laser	Rozprestretá spätná väzba
<b>ECE</b>	Economic Comission for Europe	Európska hospodárska komisia
<b>ELED</b>	Edge-Emmiting LED	Hranovo vyžarujúca LED
<b>FP laser</b>	Fabry-Perrot laser	Fabry-Perrotov laser
<b>IPTV</b>	Internet Protocol Television	Televízia cez IP protokol
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode	Svetlo emitujúca dióda
<b>PLED</b>	Power LED	Výkonná LED
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers	Spoločnosť automobilovej techniky
<b>SLED</b>	Superluminescent LED	Vysokosvietivá LED
<b>VCSEL</b>	Vertical-cavity surface-emitting laser	Plošne vyžarujúci laser
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplex	Multiplexovanie vlnových dĺžok
<b>XML</b>	Extensible Markup Language	Rozšíriteľný značkovací jazyk

## Zoznam použitých termínov

Termín	Význam termínu
<b>Elektrické napätie</b>	Elektrické napätie vyjadruje rozdiel elektrického potenciálu dvoch bodov a predstavuje energiu potrebnú na premiestnenie elektrického náboja medzi týmito dvoma bodmi v určitom elektrickom poli
<b>Elektrický prúd</b>	Elektrický prúd je usporiadaný pohyb nositeľov elektrického náboja, vyjadruje množstvo náboja prejdeného za jednotku času
<b>Intenzita osvetlenia</b>	Plošná hustota dopadajúceho svetelného toku
<b>Jas</b>	Množstvo svetla emitovaného určitou plochou dopadajúceho pod určitým uhlom
<b>Svetelný tok</b>	Svetelná energia vyžiarená zdrojom za časovú jednotku (1 s)
<b>Svietivosť</b>	Množstvo svetelného toku vyslaného zdrojom do jednotkového priestorového uhla
<b>Teplota</b>	Stavová veličina opisujúca strednú kinetickú energiu častíc
<b>Tepelný odpor</b>	Schopnosť odvádzať teplo skrz materiál
<b>Vlnová dĺžka</b>	Vzdialenosť dvoch najbližších bodov vlnenia, ktoré kmitajú vo fáze

# Obsah

Úvod.....	1
1 Svetlo a zdroje svetla .....	3
1.1 Svetlo v telekomunikáciách .....	4
1.1.1 Laserové diódy .....	4
1.1.2 LED .....	7
1.2 Svetlo v automobilovom priemysle.....	9
1.2.1 Halogénové žiarovky.....	9
1.2.2 Xenónové zdroje svetla .....	10
1.2.3 LED .....	11
2 Zdroje svetla v telekomunikáciách.....	13
2.1 Parametre zdrojov svetla v telekomunikáciách .....	13
2.2 LED v telekomunikáciách.....	14
2.3 Lasery v telekomunikáciách.....	15
3 Zdroje svetla v automobilovom priemysle.....	17
3.1 Parametre svetelných zdrojov v automobilovom priemysle .....	17
3.2 Parametre LED používaných v automobiloch .....	18
3.2.1 Svetelný tok.....	18
3.2.2 Teplota svetla .....	19
3.2.3 Elektrické vlastnosti LED .....	20
3.3 Ostatné parametre LED .....	21
4 Legislatíva upravujúca farbu bieleho svetla.....	23
4.1 CIE 1931 .....	23
4.2 Predpisy Európskeho hospodárskeho spoločenstva .....	24
4.3 Predpisy Čínskej ľudovej republiky .....	26
4.4 Predpisy Spojených štátov amerických.....	27
5 Aplikácie LED v automobilovom priemysle .....	28
5.1 Svetlovody .....	28
5.2 Reflektory.....	30
5.3 Šošovky.....	31
5.4 Refraktory .....	32
5.5 Kolimátory .....	34

6	Problematika farebných binov .....	35
6.1	Triedenie LED do binov.....	35
6.2	Triedenie do binov podľa svetelného toku.....	35
6.3	Triedenie do binov podľa teploty farby .....	35
6.4	Značenie LED podľa binov .....	36
6.4.1	Značenie LED výrobcu OSRAM .....	36
6.4.2	Značenie LED výrobcu Seoul Semiconductor .....	37
6.4.3	Značenie LED výrobcu Philips Lumileds .....	38
7	Výsledky meraní .....	39
7.1	Popis merania.....	39
7.1.1	Kalibrácia spektrometra .....	42
7.2	Stanovenie hypotéz .....	43
7.3	Hypotéza č. 1.....	45
7.3.1	Výsledky experimentu.....	47
7.3.2	Záver experimentu.....	59
7.4	Hypotéza č. 2.....	60
7.4.1	Výsledky experimentu.....	60
7.4.2	Záver experimentu.....	65
7.5	Hypotéza č. 3.....	65
7.5.1	Výsledky experimentu.....	65
7.5.2	Záver experimentu.....	73
7.6	Hypotéza č. 4.....	73
7.6.1	Výsledky experimentu.....	74
7.6.2	Záver experimentu.....	74
8	Návrh riešenia pre spoločnosť Varroc Lighting Systems .....	76
8.1	Špecifikácia problému.....	76
8.2	LabVIEW .....	76
8.3	Popis programu .....	78
8.3.1	Modul LED properties .....	78
8.3.2	Modul Add Bin.....	79
8.3.3	Modul Compare bins.....	81
9	Záver .....	83
	Citovaná literatúra.....	84
	Zoznám obrázkov a ilustrácií .....	86

Zoznam tabuliek.....	88
Zoznam príloh.....	89

---

# Úvod

LED zastávajú v dnešnej dobe v automobilovom priemysle čoraz významnejšiu úlohu. Dostávajú sa do stále nových aplikácií a nahrádzajú iné zdroje svetla pri rôznych svetelných funkciách automobilov. Vďaka ich nízkej spotrebe energie a malým rozmerom ponúkajú širokú škálu nasadenia.

Pri vývoji svetelných funkcií je potrebné dobre poznať základné charakteristiky a vlastnosti LED definované výrobcom, medzi ktoré, okrem iných, patria aj farebné súradnice bieleho svetla. Úlohou tejto diplomovej práce je overiť presnosť, s akou výrobcovia definujú tzv. farebné biny a vytvoriť aplikáciu, ktorá zjednoduší vyhodnocovanie nameraných údajov o farebných súradniciach svetla vyžarovaného LED.

Prvá kapitola diplomovej práce sa zaoberá svetlom, jeho definíciou a zdrojmi svetla. Rozdeľuje zdroje svetla na zdroje pre telekomunikačné účely a zdroje bieleho svetla pre účely vonkajšieho osvetlenia automobilov. Vysvetľuje základný princíp ich fungovania a popisuje fyzikálne deje, ktoré nastávajú pri produkovani svetla.

Druhá kapitola presnejšie definuje princípy fungovania zdrojov pre telekomunikácie. Menuje a definuje jednotlivé parametre, ktoré sú dôležité pre konkrétnu aplikáciu a porovnáva základne parametre svetelných zdrojov pre jednotlivé druhy svetelných zdrojov využívaných v automobilovom priemysle. Popisuje princíp samovoľnej a stimulovanej emisie, rozdiel medzi nimi a princíp fungovania laserov a polovodičových LED.

Kapitola číslo tri sa venuje zdrojom bieleho svetla, ktoré sú určené pre využitie v automobilovom priemysle. Podrobne rozoberá ich kľúčové parametre a zameriava sa najmä na parametre LED vyžarujúcich biele svetlo.

Dalšia, v poradí štvrtá kapitola, predstavuje stručný náhľad do legislatívy, ktorá upravuje farbu bieleho svetla pre použitie v automobilovom priemysle. Opisuje normu CIE 1931, ktorá sa zaoberá klasifikáciou farebných súradníc a na ktorú sa odvolávajú inštitúcie definujúce farbu bieleho svetla pre automobilový priemysel. Kapitola takisto porovnáva definície bieleho svetla v predpisoch Európskej hospodárskej komisie, Čínskej ľudovej republiky a Spojených štátov amerických.

Piata kapitola sa zaoberá základnými optickými komponentmi, ktoré sa využívajú v automobilovom priemysle pre prácu so svetlom vyžarovaným LED. Opisuje základné princípy reflektoru, šošovky, refraktora a kolimátora.

Šiesta kapitola ponúka prehľad o problematike triedenia LED do binov, vysvetľuje príčinu delenia LED do binov podľa farby vyžarovaného svetla, elektrického napätia a svetelného toku. Na príkladoch ilustruje, ako výrobcovia značia biny LED, a čo jednotlivé značenie vybraných výrobcov znamená.

Siedma kapitola je zameraná na meranie farebných súradníc svetla vyžarovaného LED. Popisuje prístroje, ktoré boli použité pri meraniach v laboratóriu Katedry telekomunikačnej techniky na Vysoké škole báňskej – Technickej univerzite Ostrava. Stanovuje 4 základné hypotézy, a následne pomocou experimentov a štatistického spracovania nameraných výsledkov

potvrďuje, alebo vyvracia stanovené hypotézy. Pri popise experimentov takisto dáva návod, ako merať niektoré dôležité parametre LED, pričom vychádza z metodiky merania stanovenej medzinárodnými predpismi CIE.

Spoločnosť Varroc Automotive Systems sa k 1.4.2013 premenovala na Varroc Lighting Systems. Posledná, ôsma kapitola, opisuje aplikáciu, ktorá bola navrhnutá na vyhodnocovanie meraní farebných súradníc LED v laboratóriu spoločnosti Varroc Lighting Systems. Opisuje vývojové prostredie LabVIEW a základné vlastnosti jednotlivých modulov vytvorenej aplikácie.

Súčasťou príloh sú kompletne výsledky meraní, odporúčaný postup merania v laboratóriu spoločnosti Varroc Lighting Systems, užívateľská príručka vytvoreného softwaru na spracovanie nameraných údajov a takisto jeho kompletná softwarová dokumentácia. Podrobné výsledky meraní sú potom uvedené na CD, ktoré je súčasťou diplomovej práce.

Súčasťou tejto diplomovej práce je aj jej Neverejná časť, ktorá obsahuje výsledky meraní prototypov LED Luxeon F CW ES a Luxeon F CW Premium.



---

# 1 Svetlo a zdroje svetla

Svetlo je priečne elektromagnetické vlnenie, v ktorom kmitajú v navzájom kolmých rovinách elektrické pole (charakterizované elektrickou intenzitou) a magnetické pole charakterizované magnetickou indukciou. Navyše smer oboch vektorov (vždy kolmý na smer šírenia) neustále mení svoj smer. [1] Troma základnými vlastnosťami svetla sú jeho intenzita, vlnová dĺžka a polarizácia. Vzhľadom na jeho vlnovú dĺžku hovoríme o svetle, ktoré je viditeľné ľudským okom, infračervené a ultrafialové.

Infračervené žiarenie nazývame také žiarenie, ktorého vlnová dĺžka je nižšia než 380 nm, žiarenie viditeľné ľudským okom má rozsah vlnových dĺžok 380 – 780 nm a ultrafialové svetlo má vlnovú dĺžku vyššiu ako 780 nm. Vlnová dĺžka zároveň popisuje farbu vyžarovaného svetla. Pre viditeľné svetlo platí rozloženie farebného spektra uvedeného v Tabuľke 1.1 [2]:

*Tabuľka 1.1: Rozloženie farieb v spektrálnej oblasti viditeľného žiarenia*

Vlnová dĺžka [nm]	Farebný tón spektrálnej farby
380 - 420	Fialová
420 - 440	Modrofialová
440 - 460	Modrá
460 - 510	Modrozelená
510 - 560	Zelená
560 - 590	Žltá
590 - 650	Oranžová
650 - 780	Červená

Za zdroj svetla môžeme označiť teleso, predmet alebo organizmus využívajúci svetlo, ktoré vzniká premenou z inej energie (vlastné zdroje), alebo pôsobiaci ako zdroj svetla odrazom, lomom, prípadne rozptylom svetla iných zdrojov (nevlastné zdroje). Typickým predstaviteľom vlastného zdroja svetla je napríklad Slnko, nevlastného zase Mesiak. Svetelné zdroje takisto môžeme rozdeliť na prírodné (kozmicke telesá, chemické reakcie, biologické zdroje, elektrické výboje, ...) a umelé.

Umelé zdroje svetla môžeme ďalej rozdeliť napr. podľa podstaty vzniku svetla na zdroje založené na princípe teplotného žiarenia (žiarovky), žiarenia elektrického výboja v plynch a parách kovov (žiarivky, výbojky), alebo luminiscencie (LED). K vzniku svetla v súčasných elektrických svetelných zdrojoch dochádza na základe týchto štyroch základných princípov [2]:

- inkandescenciou, alebo teplotným budením vznikajúcim pri zahriatí pevnej látky na vysokú teplotu, napr. halogenové žiarovky,

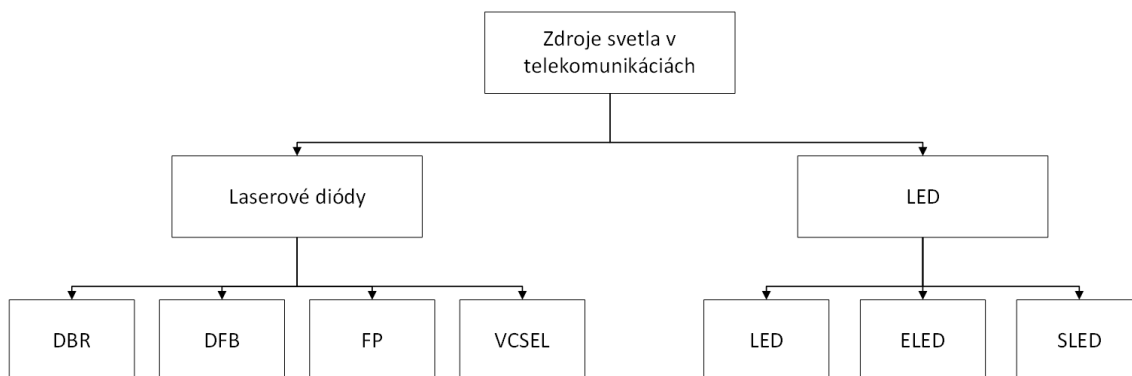
- vybudením atómu v elektrickom výboji, napr. žiarivky,
- luminiscenciou pevných látok (fotoluminiscencia, elektroluminiscencia, bioluminiscencia), napr. povlak nanesený na vnútorný povrch výbojovej trubice,
- emisiou fotónu pri prechode prúdu polovodičom, napr. LED.

## 1.1 Svetlo v telekomunikáciách

Pre telekomunikačné účely sú najčastejšie používané dva zdroje svetla: monochromatické nekoherentné a monochromatické koherentné. Ich využitie závisí na požadovaných parametroch trasy, akými sú použitie jednovidových alebo mnohovidových vlákien, dĺžka trasy, potrebná šírka pásma a pod.

V prípade nižších prenosových rýchlostí, použitia mnohovidových vlákien a kratších prenosových vzdialeností je vhodnejšie použitie monochromatického nekoherentného zdroja svetla, ktorého typickým predstaviteľom je LED. Pokiaľ uvažujeme väčšiu trasu, pri ktorej potrebujeme dosiahnuť vyššiu prenosovú rýchlosť, je vhodnejšie použitie jednovidových vlákien a monochromatických koherentných zdrojov – laserových diód.

Stručné rozdelenie zdrojov svetla pre telekomunikácie poskytuje Obrázok 1.1:



Obrázok 1.1: Rozdelenie zdrojov svetla v telekomunikáciách

Laserové diódy je ďalej možné rozdeliť z hľadiska použitého materiálu na plynové, tuhofázové dielektrické, kvapalinové a polovodičové lasery.

Z hľadiska režimu činnosti ich môžeme rozdeliť na kontinuálne, impulzné, kvázikontinuálne a lasery s moduláciou kvality. Ďalšie delenie laserov je na základe vyžarovanej vlnovej dĺžky (infračervené, lasery pracujúce vo viditeľnom spektre, ultrafialové lasery).

### 1.1.1 Laserové diódy

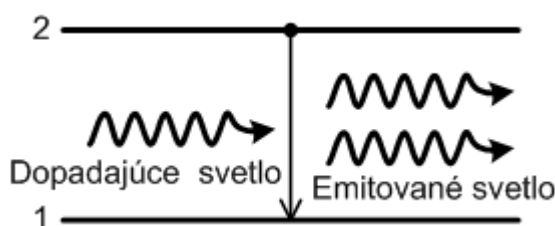
Laser (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation - zosílenie svetla stimulovanou emisiou žiarenia) je optický zdroj elektromagnetického žiarenia (svetla), kde je svetlo laserov vyžarované vo forme úzkeho zväzku a na rozdiel od prirodzených svetelných

zdrojov má špecifické vlastnosti. Toto svetlo je charakteristické jeho koherenciou a monochromaticitou. [3]

Koherencia svetla znamená, že svetlo má rovnakú frekvenciu vlnenia, smer kmitania a fáze. Je to schopnosť zväzku svetla interferovať po prejdení určitej vzdialenosti, alebo po uplynutí určitého času. Je podmienená zachovaním presnej frekvencie (monochromatickosti) a fázy na danom úseku.

V laserovom zdroji, ktorý je určitým spôsobom budený, je generované laserové vlnenie, ktorého postupnou akumuláciou dochádza k výraznému energetickému zosilneniu. Po zosilnení tohto vlnenia dochádza k jeho výstupu von z laserového zdroja vo forme lúča, ktorého vlastnosti sú následne ďalej upravené priechodom cez špeciálne optické komponenty. Takto upravený lúč, dodatočne zaostrený priechodom cez objektív, nakoniec vstupuje do pracovného priestoru.

Základom funkcie všetkých laserov je proces stimulovanej emisie (Obrázok 1.2). Na začiatku stimulovanej emisie je emitovaný samovoľný fotón, ktorý pre excitované elektróny predstavuje stimulujúci popud. Novo vzniknutý fotón má identické vlastnosti, dôsledkom čoho je úzka spektrálna čiara. Fotóny sa šíria v rovnakom smere. Rovnaký smer šírenia fotónu značí, že výstupný zväzok je smerový, čo umožňuje jednoduchú fokusáciu laserového svetla. Žiarivé rekombinácie sú synchronizované v čase, jednotlivé vlny na seba nadväzujú, čím medzi nimi vzniká fázová súvislosť. Svetlo je teda koherentné. Emitované fotóny majú vždy rovnaký smer šírenia.



Obrázok 1.2: Princíp stimulovanej emisie

U polovodičových laserov - laserových diód je však tento proces špecifický tým, že v polovodičových kryštáloch sú aktívne atómy husto vedľa seba a žiarivé prechody sa neuskutočňujú medzi diskretnými energetickými hladinami, ale medzi energetickými pásmi. Elektróny obsadzujú najnižšie energetické hladiny vo vodivostnom páse.

Aktívne prostredie v injekčných polovodičových laseroch vzniká pri injekcii elektrónov a dier z prechodu P-N, alebo z heteroprechodu. Ku generovaniu optického žiarenia potom dochádza v dôsledku zavedenia kladnej spätnej väzby, ktorá časť zosilneného signálu z výstupu prevádza na vstup. K tomuto účelu sa používajú rôzne typy rezonátorov, selektívnych odrazáčov, alebo rozloženej spätnej väzby.

Optický rezonátor je tvorený zrkadlami., podľa ich tvaru rozdeľujeme rezonátory na:

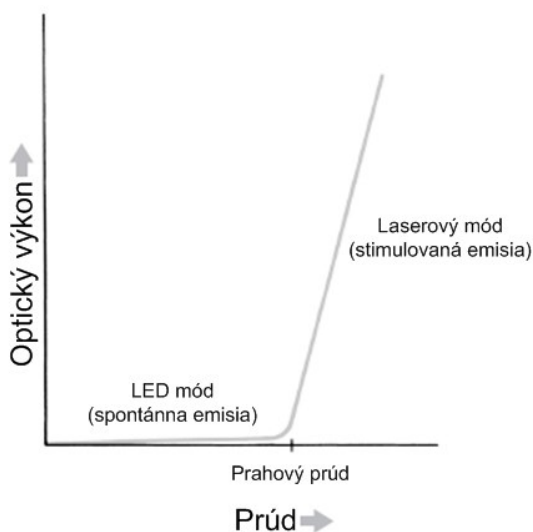
- Fabry – Perotove – rovinné zrkadlá,
- Konfokálne – polguľové zrkadlá s totožným ohniskom,
- Koncentrické – polguľové s totožným stredom krivosti,
- Hemisférické – jedno zo zrkadiel je polguľové, druhé rovinné.

Zrkadlá optického rezonátora je možné rozdeliť z hľadiska umiestnenia na interné a externé, prípadne podľa konštrukcie na kovové, dielektrické a špeciálne.

V súčasnosti je najpoužívanejším rezonátorom v polovodičových laseroch Fabry-Perotov rezonátor, stále viac sa však uplatňujú tzv. DFB lasery, u ktorých sa miesto rovnobežných zrkadiel používajú difrakčné mriežky. Vzhľadom k tomu, že pomerný index lomu rozhrania polovodičový kryštál - vzduch má pomerne vysokú hodnotu, nemusíme pri injekčných polovodičových laseroch využívať špeciálne zrkadlá. Pri nízkych prúdoch tečúcich cez PN prechod v priamom smere dochádza ku generovaniu spontánneho žiarenia šíriaceho sa vo všetkých smeroch s náhodnou fázou. Rast prúdu zvyšuje rýchlosť žiarivej rekombinácie, čo vedie k rastu hustoty fotónového toku. Generované fotóny následne stimulujú ďalšie rekombinácie. Vzhľadom k tomu, že najväčší počet generovaných fotónov má energiu rovnú energii maxima spektrálneho rozdelenia spontánnej emisie, nastáva pre túto energiu najviac vynútených prechodov. Táto okolnosť potom vedie k postupnému zužovaniu spektra spontánnej emisie a výraznému nárastu intenzity vyžarovania v oblasti maxima spektrálneho rozloženia emisie.

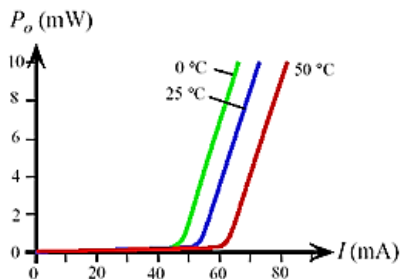
Ak rastie intenzita vyžarovania nelineárne s rastom budenia, nazývame tento proces superluminiscencia. Fotóny generované v procese superluminiscencie sa šíria rovnako ako v spontánnom režime vo všetkých smeroch s náhodnou fázou. Prechod k laserovému režimu nastáva, keď sa stimulované zosilnenie rovná stratám a žiarenie sa stáva koherentným. Koherencia sa dosahuje použitím optického rezonátora, ktorý zaistí selektívne zosilnenie elektromagnetickej vlny s určitou frekvenciou a definovanou fázou, čím vzniká stojaté vlnenie. Stupeň koherencie je daný kvalitou rezonátora. [3]

Úzka oblasť energie čerpania, pri ktorej dochádza k náhlemu prechodu z režimu spontánnej emisie do režimu stimulovanej emisie sa nazýva prah. Pri injekčných polovodičových laseroch sa jedná o prahovú hustotu budiaceho prúdu, resp. prahovým prúdom  $I_p$ . Laserová dióda pri ňom prechádza z režimu nekoherentného zdroja do režimu laseru, ako je znázornené na Obrázku 1.3.



Obrázok 1.3: Závislosť emitovaného optického výkonu na budiacom prúde

Výstupný optický výkon laserovej diódy je takisto ovplyvňovaný teplotou čipu, na ktorom sa nachádza. Hodnota prúdu pre dosiahnutie stimulovanej emisie je závislý na teplote čipu, na ktorom je laserová dióda osadená, viz. Obrázok 1.4:

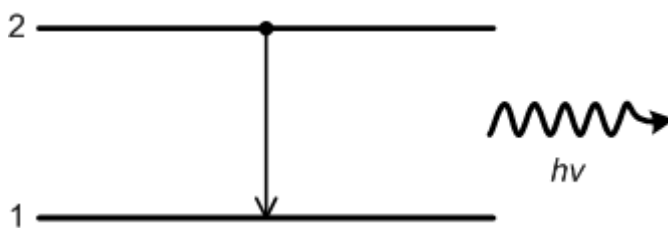


Obrázok 1.4: Závislosť prahového napätia na teplote čipu

Obrázok 1.4 predstavuje takisto tzv. P-I (niektoré zdroje uvádzajú označenie L-I) charakteristiku. Zobrazuje závislosť elektrického prúdu tečúceho do laserovej diódy a výstupnej svetelnej intenzity. S rastom teploty čipu takisto rastie prahový prúd a klesá účinnosť laserovej diódy.

### 1.1.2 LED

Princíp funkcie LED spočíva v spontánnej emisii na P-N prechode polovodiča. Elektróny sústredené v N polovodiči rekombinujú s dierami v P polovodiči. Pri tejto rekombinácii môže, ale aj nemusí dôjsť k vyžiareniu fotónu. V prípade vyžiarenia fotónu hovoríme o žiarivej rekombinácii. LED pracujú na rozdiel od laserov na princípe spontánnej emisie. Ta nastáva v prípade, keď je atóm pôvodne na hornej energetickej hladine a spontánne preskočí na nižšiu energetickú hladinu s uvoľnením svojej energie v podobe fotónu, pričom energia fotónu  $h\nu$  sa pridá k energii elektromagnetického módu, viz. Obrázok 1.5. Smer pohybu vyžiareného fotónu je vždy náhodný.



Obrázok 1.5: Spontánna emisia,  $E_{h\nu} \approx E_2 - E_1$

LED využívané na telekomunikačné účely využívajú výhradne žiarivú rekombináciu. Ich typickými rysmi sú nižšie prúdové hustoty, využitie samovoľnej emisie, nekoherentnosť žiarenia a v porovnaní s laserovými diódami aj širšia spektrálna čiara, ktorá dosahuje približne 30-40 nm. Hlavnými výhodami LED oproti laserovým diódam sú ich jednoduchšia výroba, menšie výrobné náklady, vyššia spoľahlivosť, menšia teplotná závislosť, linearita a takisto jednoduchšie radiacie obvody. Na druhej strane, medzi nevýhody LED patrí menší výstupný výkon, menšia šírka pásma a harmonické skreslenie. Preto je hlavnou aplikáciou LED v telekomunikáciách budenie mnohovidových vlákien pri optických komunikáciách

na maximálne vzdialenosti do 3 km, pri budovaní lokálnych sietí a pri prenosových rýchlostiach do  $100 \text{ Mbit.s}^{-1}$ , výnimočne takisto pri budení jednovidových vlákien. [4]

LED využívané na vláknové komunikačné účely sú značne odlišné od LED používaných v osvetľovacích funkciách. Pri komunikačných LED je základom vysoká efektivita naviazania svetla z LED do vlákna. Len svetlo dopadajúce z jednej plochy môže byť naviazané do optického vlákna. Táto plocha je práve plocha, ktorá musí priliehať k optickému vláknu, preto pri týchto typoch LED je najdôležitejšie, aby na tejto ploche dochádzalo k čo najväčšiemu žiareniu. Za účelom zlepšenia väzby svetla pri budení optického vlákna je potrebné, aby táto plocha vyžarovania bola menšia ako plocha optického vlákna, do ktorej bude svetlo z LED naviazané. Preto sú pre budenie zvyčajných mnohovidových vlákien s priemerom 50-100  $\mu\text{m}$  používané LED s priemerom efektívnej plochy žiarenia približne 20-50  $\mu\text{m}$ . [5]

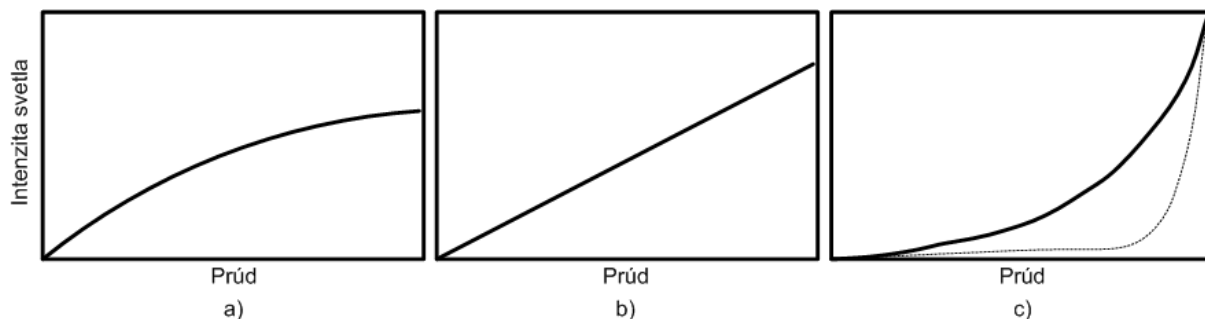
LED využívané pre komunikáciu obvykle pracujú na vlnových dĺžkach 650-1 300 nm. V závislosti na používanej technológii, vláknová optika zvyčajne používa vlnové dĺžky 650, 850 a 1 300 nm, pričom vlnová dĺžka 650 nm je používaná najmä pri plastových vláknoch. Pri bezvláknových komunikačných aplikáciách sa obvykle využívajú vlnové dĺžky v rozmedzí 870-950 nm, ktoré spadajú do infračerveného spektra. Toto rozpätie dovoľuje, že bezdrôtová komunikácia zostáva pre ľudské oko neviditeľná a tým pádom neruší a neobťažuje.

Tento typ bezvláknovej komunikácie zahŕňa vzdialenosti do približne 100 m a keďže je prenosovým médium vzduch, tak toto médium môžeme považovať za bezstratové a nedisperzné. Najdôležitejším parametrom pri LED používaných pri bezdrôtovej komunikácii je celkový svetelný výkon, čo znamená, že musí byť dosiahnutá čo najvyššia vnútorná efektivita LED.

Jedným z najpoužívanejších typov LED v telekomunikáciách sú hranovo vyžarujúce LED, anglicky Edge-emitting LEDs - ELED. Ich typickou vlastnosťou je vysoká svietivosť, ktorá umožňuje vysokú efektivitu pri nadväzovaní svetla do optického vlákna. Hranovo vyžarujúce LED využívajú totálny odraz v obsiahnutej vlnovodnej oblasti.

Supersvietivé luminiscenčné diódy (Superluminescent diode - SLED) sú širokopásmové vysokosvietivé nekoherentné zdroje svetla. Tento typ diód je vhodný pre použitie v aplikáciách s jednovidovými vláknami a takisto vysokosvietivé zdroje svetla pre analýzu optických komponentov. Supersvietivé diódy sú hranovo vyžarujúce LED, ktoré sú dotované tak vysokými prúdovými úrovňami, až v nich dochádza k stimulovanej emisii. Následkom toho majú SLED výrazne lepšie koherenčné vlastnosti než klasické LED. [5]

Pri porovnávaní Watt-Ampérových charakteristík jednotlivých druhov LED môžeme pozorovať značnú zmenu linearity krivky, viz. Obrázok 1.6. Na obrázku c) je pre lepšiu ilustráciu čiarkovanou čiarou zanesená W-A charakteristika laserovej diódy.



Obrázok 1.6: Watt-Ampérová charakteristika a) LED, b) ELED, c) SLED

## 1.2 Svetlo v automobilovom priemysle

Na vonkajšie osvetlenie automobilu je kladených niekoľko nárokov. Už dávno sa nejedná len o ich funkcionálnu osvetľovanie vonkajšieho prostredia vozidla a signalizáciu. Okrem týchto dvoch základných požiadavkou existuje mnoho iných, napr.:

- estetické a dizajnové nároky,
- ochrana chodcov,
- ochrana životného prostredia,
- minimalizácia výrobných nákladov a nákladov na vývoj,
- maximalizovanie životnosti zdrojov svetla,
- zvýšenie komfortu vodiča apod.

Ako zdroje vonkajšieho osvetlenia automobilov sa v súčasnej dobe používajú tri základné typy zdrojov - halogénové, výbojkové (xenónové) a LED.

### 1.2.1 Halogénové žiarovky

Halogénová žiarovka je najviac používané svietidlo v automobiloch. Princíp jej fungovania je pomerne jednoduchý - prúd prechádza cez špeciálne vlákno umiestnené v sklenenej banke, ktorá je napustená plynom (napr. jódom, alebo brómom). Pri rozžeravení vlákna dochádza k chemickej reakcii, kde sa materiál vlákna vyparuje a znova usádza na horúcich miestach.

Banka žiarovky sa pri svietení stáva veľmi horúca, preto sa vyrába z kremičitého skla a nie z obyčajného, ktoré by sa pri tak vysokých teplotách stalo mäkkým a tekutým. Používaním kremičitého skla dochádza k tomu, že žiarovka sa stáva zdrojom UV-B žiarenia, nakoľko kremičité sklo na rozdiel od klasického toto žiarenie nefiltruje. Preto sa zvykne povrch halogénovej žiarovky potahovať tenkým filmom z klasického skla, ktorý slúži na zadržanie UV-B žiarenia. Kremičité sklo je veľmi citlivé na masť. Môže byť poškodené aj obyčajným dotykom ruky, pretože pri dotyku sa preniesť masť z ruky na kremičité sklo, čím nastane zmena štruktúry skla a žiarovka sa po zahriatí spáli. Preto sú halogénové žiarovky zvyčajne

vybavené špičkou z kremičitého piesku, za ktorú je možné žiarovku uchopiť (viz. Obrázok 1.7 [6]).



Obrázok 1.7: Halogénová žiarovka Osram SILVERSTAR 2.0

Medzi základné typy halogénových žiaroviek používaných v automobiloch patria:

- H1 - jednovláknová halogénová žiarovka používaná hlavne v predných svetlometoch,
- H2 - jednovláknová žiarovka, dnes už takmer nepoužívaná,
- H3 - jednovláknová žiarovka, používa sa hlavne v predných hmlových svetlách,
- H4 - dvojitá vláknová žiarovka, dnes najrozšírenejšia, používa sa v predných svetlometoch,
- H7 - jednovláknová halogénová žiarovka, používaná takisto v predných svetlometoch,
- H15 - dvojitá vláknová žiarovka, ktorá je využívaná hlavne vo funkcii denného svietenia, stretávacích a diaľkových svetiel,
- P21/5W - dvojitá vláknová žiarovka, ktorú je možné nájsť v zadných obrysových/brzdových svetlách, jednovláknová verzia P21W sa používa takisto pri smerových svetlách alebo indikátoroch cúvania vozidla.

### 1.2.2 Xenónové zdroje svetla

Xenónové svetlá sa v automobilovom priemysle využívajú výhradne ako zdroje svetla pre stretávaciu a diaľkovú funkciu predných svetlometov automobilu. Podstatným konštrukčným rozdielom v porovnaní s halogénovými žiarovkami je, že xenónové svetlá neobsahujú vlákno. Pri xenónových žiarovkách je svetlo tvorené elektrickým výbojom (odtiaľ aj časté označenie H. I. D. - High Intensity Discharge, výboj s vysokou intenzitou) medzi dvoma elektródami, ktoré sú uložené v sklenenej trubici naplnenej xenónovým plynom, ortuťou a halogenidovými časticami (Obrázok 1.8 [6]). Vzhľadom k absencii vlákna sa celé konštrukčné riešenie stáva odolnejší voči vibráciám a mechanickému namáhaniu. ďalšou nespornou výhodou xenónových svetiel je fakt, že v prípade opotrebenia neprestanú svietiť okamžite, ale postupne začne klesať intenzita produkovaného svetla. V moderných xenónových žiarovkách je snaha zamedziť používaniu ortuti ako súčasti xenónových žiaroviek, keďže ortuť značne zaťažuje životné prostredie.



Xenónové svetlá potrebujú výrazne vyššie napätie pre štart žiaroviek. Toto napätie môže dosiahnuť až 23 kV, a zároveň majú vysoké požiadavky na stabilný zdroj napätia pri prevádzke. Z tohto dôvodu je potrebná dodatočná elektronika, ktorá dokáže uspokojiť obe potreby xenónových žiaroviek.



Obrázok 1.8: Xenónová žiarovka Osram XENARC Original

Často zanedbávanou povinnosťou uloženou zo zákona, ktorú majitelia vozidiel nerešpektujú pri prestavbe vozidla z halogénových žiaroviek na xenónové, je potreba externého ostrekovača optiky xenónového svetla. Vzhľadom na vysoké optické výkony xenónovej žiarovky dokážu nečistoty na vonkajšej strane optiky svetlometu spôsobiť výrazný rozptyl optického výkonu, čo následne vedie k neželanému osľňovaniu nielen vodičov protiidúcich automobilov, ale aj chodcov a ostatných účastníkov cestnej premávky.

### 1.2.3 LED

LED diódy v dnešnej dobe postupne nahrádzajú ostatné zdroje svetla ako vo vonkajšom, tak aj vnútornom osvetlení automobilu, vďaka ich vysokej svietivosti. Zvyčajne sa používa kombinácia niekoľkých LED pre jednu svetelnú funkciu automobilu, čo zároveň dovoľuje vytváranie dizajnovo zaujímavých konceptov, ktoré sa neraz stávajú charakteristickými prvkami automobilu. Túto skutočnosť je jasne vidieť napríklad pri vozidlách Range Rover (model Evoque), modelových radách Audi (všetkým modelovým radám vládne charakteristický tvar LED pásiku v predných svetlometoch), prípadne BMW (tzv. Angel Eye - svetelný kruh obkolesujúci samotné projektory svetiel). Ďalšou nespornou výhodou LED je ich nízka spotreba elektrickej energie, čo sa v prípade ich nasadenia v roli všetkých svetelných funkcií automobilu prejavuje nižšou spotrebou paliva vozidla, čo vedie k ochrane životného prostredia a šetreniu vyčerpatelných zdrojov energie.

Na rozdiel od halogénových žiaroviek a xenónových zdrojov svetla majú podstatne vyššiu životnosť (výrobcovia LED uvádzajú až 50 000 hodín premávky pri splnení operačných požiadaviek, ako sú maximálne napätie apod.).

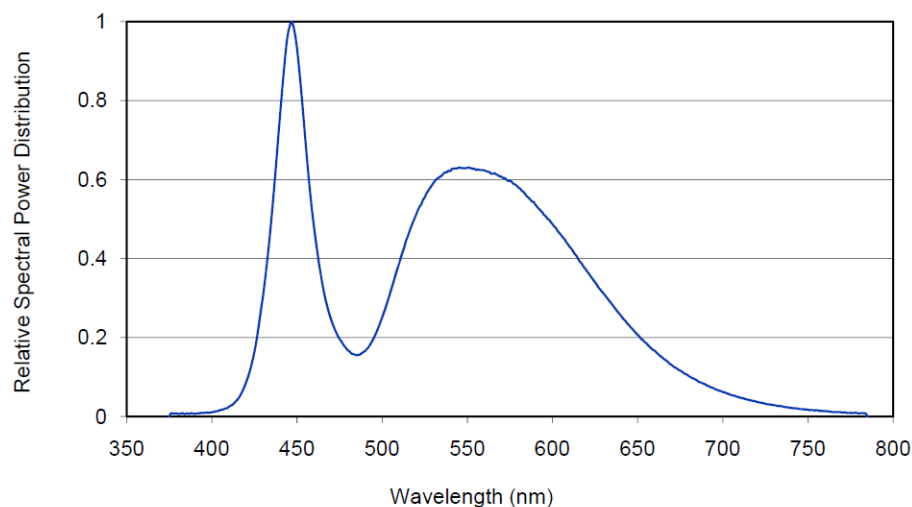
Biele svetlo vyžarované LED je možné dosiahnuť dvomi spôsobmi:

1. Priamym miešaním svetla červenej, zelenej a modrej LED,
2. Fosforescenciou luminoforov.

Pri miešaní základných farieb RGB spektra je potrebné využívať náročný hardware a software pre ovládanie pomeru farieb. Výsledný jas je nižší a v dôsledku nerovnomernej degradácie jednotlivých druhov čipov môže v priebehu života LED dochádzať k nežiaducim posunom farby vyžarovaného svetla.

Pre biele svetlo vo vonkajšom automobilovom priemysle sú zvyčajne používané tzv. Power LED (PLED), ktoré ponúkajú vysoký svetelný výkon pri relatívne nízkom pracovnom prúde a napätí.

Pri použití fosforescencie luminoforov sa zvyčajne používa ytrito-hlinitý granát aktivovaný cérom (chemický vzorec  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ ), ktorý je budený svetlom modrej diódy InGaN, alebo trojpásmový luminofor budený žiarením ultrafialovej diódy. Typické emisné spektrum bielej LED, kde je luminofor budený modrým svetlom diódy môžeme vidieť na Obrázku 1.9 [7]. Ide o LED výrobcu Philips Lumileds, konkrétne o sériu LUXEON® Rebel a prevedenie Cool-White pri teplote dosky 25 °C a prúde 350 mA.



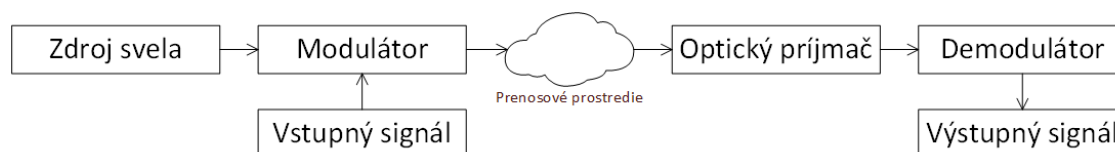
Obrázok 1.9: Emisné spektrum bielej LED (luminofor budený modrým svetlom)

---

## 2 Zdroje svetla v telekomunikáciách

Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, najčastejšími zdrojmi svetla využívaných v telekomunikáciách sú LED a laserové diódy. Limitujúcimi parametrami optických trás sú ich dĺžka a prenosová rýchlosť. Tieto parametre sú úzko zviazané, nakoľko s rastúcou dĺžkou môže klesať prenosová rýchlosť, ktorú je možné detektorom bezpečne rozpoznať.

Základná schéma optickej prenosovej trasy, ktorá ilustruje všetky prvky v optickom komunikačnom reťazci je uvedená na Obrázku 2.1.



Obrázok 2.1: Základná schéma optickej prenosovej trasy

V nasledujúcich kapitolách sa bližšie pozrieme na jednotlivé parametre, ktoré sú dôležité pre zdroje svetla používaných na telekomunikačné účely. Rozdiely medzi vlastnosťami zdrojov zahŕňajú rozdiely v prenosovej rýchlosti, výkone, fyzikálnej a optickej účinnosti viazania svetla, smerovosti (výstupného vzoru), spektrálnej šírky, koherencie a ceny. [8]

### 2.1 Parametre zdrojov svetla v telekomunikáciách

Rýchlosť je pojem priamo spojený s tzv. dobou cyklu, v katalógoch obvykle vyjadrenú pomocou parametrov *rise time* a *fall time*. Jedná sa o dobu, ktorú zdroj svetla potrebuje na dosiahnutie špičky optického výkonu a jeho následný pokles do pôvodnej hladiny optického výkonu. Čím viac cyklov dokáže zdroj svetla vykonať, tým vyššiu prenosovú rýchlosť dokáže poskytnúť pri použití modulácie. Zdroj svetla nikdy nedosahuje nulovú hladinu, nakoľko by to značne mohlo ovplyvniť jeho prenosovú rýchlosť. Pre dosiahnutie vyšších rýchlostí je vhodnejšie použitie laserov, než LED.

Výkon odkazuje na optický výkon, resp. intenzitu svetla. Vyšší výkon dokáže prekonať vyššiu hladinu útlmu, čo znamená prekonanie väčšej vzdialenosti, alebo komplikovanejšej topológie bez potreby zosilnenia. Laserové zdroje svetla dosahujú oveľa väčšie výkony ako LED.

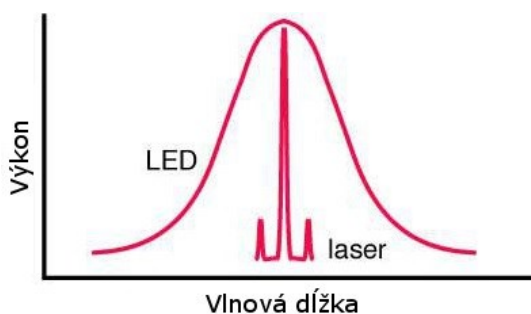
Účinnosť viazania svetla sa spája s účinnosťou, s ktorou je zdroj svetla pripojený k optickému vláknu. Čím presnejšie zdroj svetla naviaže svetlo do jadra optického vlákna, tým menej výkonu je strateného a viac výkonu je naviazaného do optického vlákna. Najlepšiu účinnosť pri nadväzovaní svetla dosahujú lasery v kombinácii s jednovidovými vláknami.

Smerovosť svetla vyjadruje rozsah svetelného lúča, ktorý lúč zaberá v optickom vlákne. LED emitujú zvyčajne značne divergentné svetelné lúče, naopak laserové lúče majú veľmi malú divergenciu.

Spektrálna šírka vyjadruje rozsah vlnových dĺžok, ktoré sú vyžarované zdrojom. LED majú výrazne širokú spektrálnu čiaru, naopak spektrálna šírka laserov je veľmi malá, preto sú

vhodné pre optické prenosové systémy, ktoré prenášajú signál na veľké vzdialenosti a používajú multiplexovanie viacerých vlnových dĺžok.

Znázornenie rozdielu medzi spektrálnou šírkou LED a laserovej diódy znázorňuje Obrázok 2.2:



Obrázok 2.2: Spektrálna šírka LED a laserovej diódy

Pojem koherencie už bol vysvetlený v predchádzajúcej kapitole, jedná sa o vzájomný posun medzi fázami svetla. Cena je pri návrhu optických trás dôležitým parametrom. Návrh trasy vždy predstavuje hľadanie kompromisu medzi celkovým výkonom optickej trasy a nákladmi potrebnými na jej vybudovanie. [8]

## 2.2 LED v telekomunikáciách

V počiatkoch optických komunikácií boli LED vďaka svojej cene a výkone hojne používanými zdrojmi svetla. LED majú relatívne dlhý rise time a fall time, preto dosahujú pomerne nízku šírku pásma. LED majú širokú spektrálnu čiaru, čo ich predurčuje na použitie v kombinácii s mnohovidovými vláknami. V dnešnej dobe sa už nevyužívajú na dlhých trasách a nachádzajú uplatnenie skôr v prístupových sieťach. LED sú lacné a ich životnosť je pomerne vysoká.

Pozrime sa teraz na hodnoty z katalógového listu LED Hamamatsu SLD L8414-04 a rozoberme význam jednotlivých parametrov uvedených na Obrázku 2.3 [9]:

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Peak Emission Wavelength	$\lambda_p$	810	830	850	nm
Spectral Radiation Half Bandwidth	$\Delta \lambda$	10	15	25	nm
Forward Voltage	$V_F$	1.8	2.0	2.2	V
Forward Current	$I_F$	-	100	120	mA
Beam Spread Angle : Parallel	$\theta_{//}$	15	20	25	degree
: Vertical	$\theta_{\perp}$	25	35	45	degree
Monitor PD Current	$I_m$	80	160	260	$\mu A$
Cut-off Frequency	$f_c$	-	90	-	MHz
Coherent Length	$L_c$	-	50	-	$\mu m$

Obrázok 2.3: Vybrané optické parametre Hamamatsu SLD L8414-04

*Peak Emission Wavelength* predstavuje dominantnú vlnovú dĺžku, v ktorej sa nachádza vrchol vyžarovacej charakteristiky LED. *Spectral Radiation Half Bandwidth* udáva šírku spektra v emisnom spektre, v ktorom je sústredená aspoň polovica optického výkonu. V tomto prípade to znamená, že viac ako polovica optického výkonu LED je rozmiestnená medzi vlnovými dĺžkami 822,5 a 837,5 nm. Parametre *Forward Voltage* a *Forward Current* hovorí o doprednom

napätí a prúde, v ktorom LED operuje. *Parallel a Vertical Beam Spread Angle* určujú uhol divergencie vyžarovaného lúča. *Monitor PD Current* je úbytok elektrického prúdu na P-N prechode. *Cut-off Frequency* vyjadruje maximálnu frekvenciu signálu, ktorú je schopná LED modulovať. V podstate sa jedná o šírku pásma LED. *Coherent Length* znamená koherentú dĺžku, ktorá predstavuje vzdialenosť, o ktorú sa môžu líšiť dráhy dvoch vln, aby došlo k ich interferenciám.

V katalógu výrobcu nie je uvedená hodnota *Rise time* a *Fall time*, ale je uvedená hodnota *Cut-off Frequency*, ktorá je z týchto hodnôt vypočítaná podľa vzťahu 2.1:

$$f_c = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{1}{(\tau_r + \tau_f)} \quad (2.1),$$

kde  $f_c$  je maximálna frekvencia signálu, ktorú je LED schopná modulovať,  $\tau_r$  predstavuje dĺžku trvania vzostupnej hrany (rise time) a  $\tau_f$  dĺžku trvania zostupnej hrany LED (fall time).

### 2.3 Lasery v telekomunikáciách

Laserové diódy postupne vytlačili LED, napriek tomu, že ich prevádzka je omnoho náročnejšia a ich náklady na výrobu sú vyššie. Rovnako vyžadujú drahšie a zložitejšie riadiace elektronické obvody, ktoré vyžadujú väčšiu kontrolu okolitej teploty. Napriek týmto nevýhodám dosahujú vyššie prenosové rýchlosti. Ponúkajú vysokú účinnosť (ako optickú, tak aj mechanickú) pri nadväzovaní svetla do optického vlákna. Okrem toho dokážu lasery vysielat' na vlnových dĺžkach podstatne vyšších ako 850 nm. Pri týchto vyšších vlnových dĺžkach je zvyčajne útlm signálu podstatne nižší, preto dovoľujú preniesť signál na väčšiu vzdialenosť bez zosilnenia signálu. Vďaka ich úzkej spektrálnej čiare je možné použitie WDM (Wavelegnth Division Multiplex) technológie, ktorá dnes zažíva výrazný vzostup a nasadzuje sa vo väčšine nových aplikácií. Technológia WDM sietí umožňuje multiplexovanie niekoľkých vidov s rozdielnymi vlnovými dĺžkami do jedného jednovidového optického vlákna, čím značne zvyšuje množstvo informácií prenesených optickým vláknom. Táto technológia je nasadzovaná nielen na chrbtové spoje, ale čoraz častejšie aj do prístupových sietí rôznych operátorov, čo umožňuje dosahovanie vyšších prenosových rýchlostí na strane zákazníka a s tým spojenú možnosť ponúkať ďalšie rozšírené služby v podobe IPTV a podobne.

Pozrime sa opäť na katalógový list na Obrázku 2.4, tento krát pôjde o laserovú diódu výrobcu Renesas a model NX8369TS [10]:

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Mean Optical Output Power	$P_r$			-3		dBm
Peak Emission Wavelength	$\lambda_p$	CW, $P_r = -3$ dBm	1 290		1 330	nm
Spectral Width	$\Delta\lambda$	CW, $P_r = -3$ dBm, 20 dB down			1	nm
Side Mode Suppression Ratio	SMSR	CW, $P_r = -3$ dBm	35			dB
Threshold Current	$I_{th}$	CW, $T_c = 25^\circ\text{C}$		8	15	mA
		CW	2		30	
Differential Efficiency	$\eta_d$	CW, $P_r = -3$ dBm, $T_c = 25^\circ\text{C}$	0.016	0.023	0.032	W/A
		CW, $P_r = -3$ dBm	0.006		0.048	
Temperature Dependence of Differential Efficiency	$\Delta\eta_d$	$\Delta\eta_d = 10 \log \frac{\eta_d}{\eta_d (@ 25^\circ\text{C})}$	-3.5		1.5	dB
Operation Voltage	$V_{op}$	CW, $P_r = -3$ dBm	0.5		2.2	V
Monitor Current	$I_m$	CW, $P_r = -3$ dBm	100		1 000	$\mu\text{A}$
Monitor Dark Current	$I_D$	$V_R = 3.3$ V, $T_c = 25^\circ\text{C}$			10	nA
		$V_R = 3.3$ V			500	
Rise Time	$t_r$	20-80% *1			50	ps
Fall Time	$t_f$	20-80% *1			50	ps
Monitor PD Terminal Capacitance	$C_t$	$V_R = 3.3$ V, $f = 1$ MHz		6	20	pF
Relative Intensity Noise	RIN	*1			-128	dB/Hz
Tracking Error <sup>2</sup>	$\gamma$		-1.25		1.25	dB

Obrázok 2.4: Vybrané parametre laserovej diódy Renesas NX8369TS

Parameter *Mean Optical Output Power* vyjadruje maximálny výstupný výkon laseru, *Peak Emission Wavelength* definuje pracovnú vlnovú dĺžku. *Spectral Width* hovorí o šírke spektrálnej čiary, *Threshold Current* označuje prahové napätie, pri ktorom laser zahájí laserovú činnosť (stimulovanú emisiu fotónov). Parameter *Temperature Dependence of Differential Efficiency* vyjadruje závislosť sklonu krivky efektivity premeny energie v závislosti na teplote. *Operation Voltage* vyjadruje rozsah elektrického prúdu, pri ktorom je laserová dióda schopná pracovať. Význam parametrov *Rise Time* a *Fall time* bol vysvetlený už pri LED. Ostatné parametre pre nás nie sú až tak zaujímavé a slúžia skôr ako doplnkové.

Pri tejto laserovej dióde výrobca neudáva parameter *Cut-off Frequency*, ale jednotlivé doby trvania vzostupnej a zostupnej hrany. Podľa vzťahu (2.1) môžeme ľahko vypočítať, že medzná frekvencia tejto laserovej diódy je:

$$f_c = \frac{\sqrt{3}}{2\pi(\tau_r + \tau_f)} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi(50 \times 10^{-9} + 50 \times 10^{-9})} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi 100 \times 10^{-9}} = 2,7 \times 10^{10} \text{ Hz}$$

$$= \underline{\underline{27 \text{ GHz}}}$$

Vidíme teda, že modulačná rýchlosť laserovej diódy je rádovo vyššia ako modulačná rýchlosť LED, ktorá dosahovala 90 MHz. Takisto môžeme porovnať šírku spektrálnej čiary  $\Delta\lambda$ , ktorá pri laserovej dióde môže podľa údajov od výrobcu dosiahnuť maximálne 1 nm, avšak pri LED je minimálne 10 nm. Výrobca laserovej diódy v katalógu neuvádza hodnotu koherentnej dĺžky, avšak už podľa porovnaných parametrov je očividné, že by bola ďaleko vyššia ako pri LED.

### 3 Zdroje svetla v automobilovom priemysle

Požiadavky na zdroje svetla v automobilovom priemysle sa značne líšia od zdrojov svetla pre telekomunikácie. Nie je u nich dôležitá rýchlosť odozvy, takisto u nich nie je vyžadovaná malá spektrálna šírka. Pozrime sa na niektoré pojmy osvetľovacej techniky, ktoré zároveň z časti popisujú základné sledované parametre zdrojov vonkajšieho automobilového osvetlenia, ktoré sú uvedené v Tabuľke 3.1.

Tabuľka 3.1: Vybrané veličiny osvetľovacej techniky

Veličina	Označenie veličiny a vzťah	Jednotka	Označenie jednotky
Svietivosť	$I = \frac{d\phi}{d\omega}$	Kandela	cd
Svetelný tok	$d\phi = I \times d\omega$	Lumen	lm
Jas	$L = \frac{dI}{dS \times \cos \alpha}$	Kandela na meter štvorcový	cd/m <sup>2</sup>
Intenzita osvetlenia	$E = \frac{\phi}{S}$	Lux	lx

Svietivosť udáva priestorovú hustotu svetelného toku v rôznych smeroch. Je možné ju určiť len pre bodový zdroj svetla. Bodovým zdrojom svetla rozumieme taký zdroj, ktorého priestorové rozmery sú zanedbateľné v porovnaní so vzdialenosťou zdroja od kontrolného bodu. Luminiscenčné diódy sú považované za bodový zdroj svetla.

Svetelný tok vyjadruje množstvo svetelnej energie, ktorú prenesie žiarenie alebo zdroj vyžiari za jednotku času. Charakterizuje teda svetelný výkon žiarenia, resp. jeho zdroja.

Jas je fotometrická veličina vyjadrujúca svietivosť na jednotkovej ploche, pričom svetlo putuje v danom smere. Popisuje množstvo svetla, ktoré je vyžiarené určitým telesom alebo plochou a dopadá pod určeným uhlom.

Intenzita osvetlenia je definovaná ako svetelný tok dopadajúci na určitú plochu. Je podielom svetelného toku a plochy.

#### 3.1 Parametre svetelných zdrojov v automobilovom priemysle

Na svetelné zdroje používané v automobilovom priemysle je kladených hneď niekoľko nárokov, kde sa len ťažko dá určiť, ktorý má väčšiu prioritu než iný.

Z hľadiska svetla je dôležitým parametrom svietivosť, resp. svetelný tok zdroja. Svetivosť udáva priestorovú hustotu svetelného toku zdroja v rôznych smeroch. Svetelný tok zase vyjadruje množstvo svetelnej energie, ktorú prenesie žiarenie, alebo zdroj vyžiari za časovú jednotku. V podstate charakterizuje svetelný výkon žiarenia, resp. jeho zdroja. Ďalšou sledovanou vlastnosťou zdroja svetla v automobile je uhol jeho vyžarovania. Ten pri LED

dosahuje typicky  $120^\circ$ , jedná sa zvyčajne o Lambertovské žiariče. V neposlednom rade je pri zdrojoch bieleho svetla dôležitá teplota svetla, tá charakterizuje spektrálne zloženie bieleho svetla. Ide o žiarenie čierneho telesa, ktoré je zahriate na túto teplotu.

Z elektrických veličín sú v automobilovom osvetlení dôležité parametre nominálne napätie, nominálny prúd a z toho vyplývajúci príkon svetelného zdroja.

Z hľadiska vývoja svetelných funkcií sú dôležité rozmery svetelných zdrojov, ich životnosť a v neposlednej rade aj cena svetelného zdroja.

Keďže je táto práca venovaná najmä bielym LED používaných vo vonkajšom automobilovom priemysle, budeme sa v ďalších kapitolách zaoberať výhradne parametrami bielych LED a príležitostne ich porovnáme s parametrami iných zdrojov (halogénové žiarovky, xenónové výbojky).

## 3.2 Parametre LED používaných v automobiloch

LED používané na vonkajšie osvetlenie automobilov musia spĺňať požiadavky na medzinárodné normy, ktoré budú rozobrané v rámci tejto práce neskôr.

V nasledujúcich podkapitolách sa budeme venovať výhradne LED, ktoré majú jeden P-N prechod. Existujú aj LED, kde je osadených niekoľko prechodov na jednom čipe, čím dosahujú vysokej svietivosti. Ich parametre sa teda značne líšia od tzv. jednočipových LED, avšak vychádzajú práve z ich parametrov. Praktický rozdiel uvidíme v rámci práce pri porovnávaní parametrov meraných LED.

### 3.2.1 Svetelný tok

Ako bolo spomenuté v kapitole 3.1, svetelný tok charakterizuje výkon žiarenia, resp. zdroja žiarenia. Pre výkonové LED sa môžu hodnoty svetelného toku značne líšiť, viz. Tabuľka 3.2 [7], [11], [12], [6]:

Tabuľka 3.2: Hodnoty svetelného toku vybraných LED

Výrobca	Model	Nominálny prúd [mA]	Nominálne napätie [V]	Svetelný tok [lm]
Seoul	Z5	350	3,3	91 - 118,5
Nichia	NJSW172	350	3,3	72 - 144
Philips	Rebel	350	3,15	40 - 100
Osram	LW W5SN	700	3,45	82 - 150

V porovnaní s halogénovými žiarovkami typu H4 produkujúcimi približne 1 100-1 600 lm a xenónovými žiarovkami produkujúcimi 2 600-3 200 lm sú tieto hodnoty nízke, avšak nesmieme zabúdať, že LED sú zvyčajne používané v sústavách, ktoré tvoria funkčné aj dizajnové celky. Výrobcovia proklamujú, že nové typy LED, ktoré sú momentálne vo vývoji, budú dosahovať hodnoty až 230 lm, zatiaľ však tieto LED nie sú v predaji.



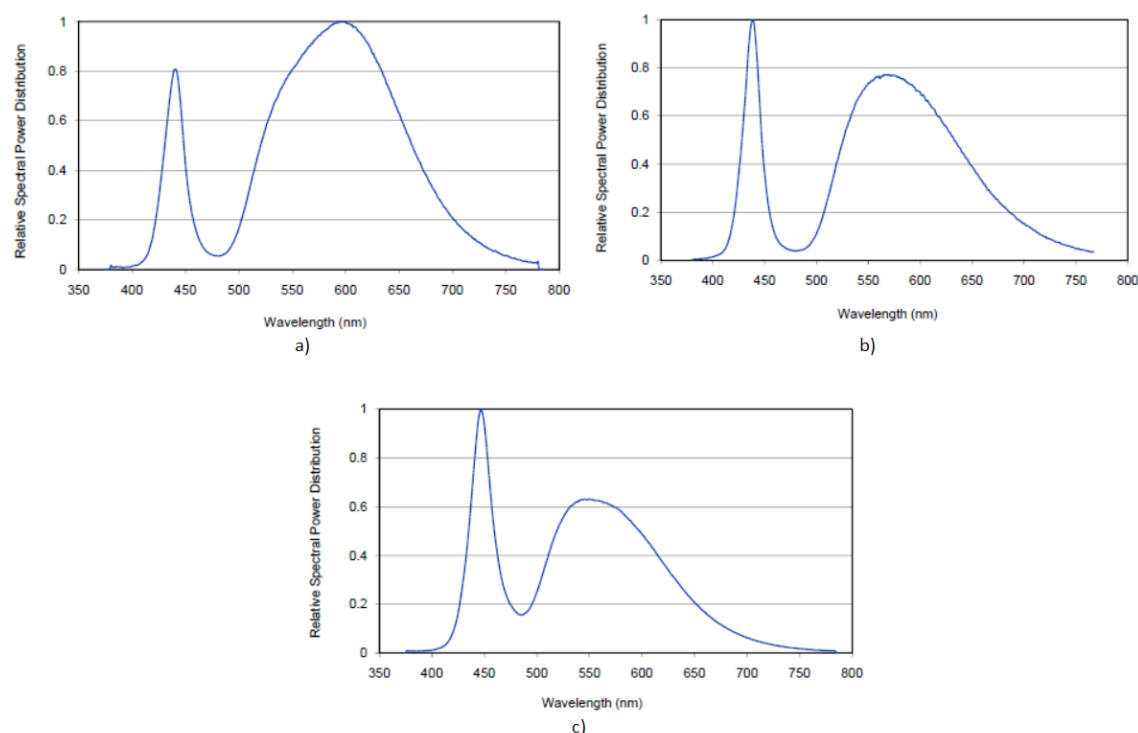
Keď však porovnáme ich svetelný tok so žiarovkami typu W5W používanými na funkciu obrysových/pozičných svetiel v nových automobiloch, ktoré dosahujú približne 50 lm, zistíme, že LED ich dokážu plne nahradiť.

### 3.2.2 Teplota svetla

Výrobcovia dnes ponúkajú širokú škálu LED, ktoré plne pokrývajú normami stanovený rozsah teplôt svetla. LED diódy preto výrobcovia často rozdeľujú na studené (cool), neutrálne (neutral) a teplé (warm) svetlo. Klasifikácia teploty svetla LED sa medzi výrobcami líši, ale približné hodnoty sú nasledovné:

- Teplé svetlo: 2 540 – 3 500 K,
- Neutrálne svetlo: 3 500 – 4 500 K,
- Studené svetlo: 4 500 – 10 000 K.

Zjednodušene povedané, zdroje, ktoré produkujú teplé biele svetlo majú farbu podobnú viac žltej, a zdroje vyžarujúce studené svetlo majú farbu svetla ladenú skôr do modra. Zmena farebného podania LED spočíva v hrúbke luminoforu použitého v LED. Vrstva luminoforu mení zloženie vyžarovaného spektra, pre lepšiu ilustráciu je vhodné všimnúť si zmeny spektra pri jednotlivých teplotách farieb ilustrovaných na LED Philips Lumileds LUXEON Rebel na Obrázku 3.1 [7]:



Obrázok 3.1: Spektrum svetla pre: a) warm white, b) neutral white, c) cool white

Na predchádzajúcom obrázku vidíme vždy dve dominantné farby, ktoré ovplyvňujú spektrum bieleho svetla: v okolí 440 nm je to výrazná špička modrého svetla (vlastné svetlo diódy) a v rozmedzí 550 - 600 nm sa nachádza výrazná vrchol druhej špičky, ktorá v tomto

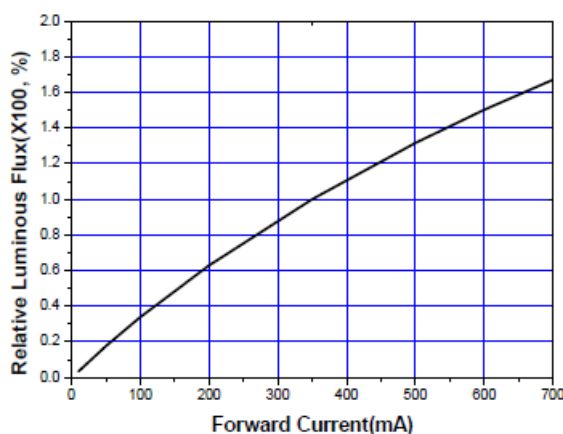
pripade predstavuje žltú farbu reprezentovanú vrstvou luminoforu. Z ich vzájomného pomeru vidíme, že pri teplom bielom svetle (3 100 K) prevláda žltá zložka spektra, s rastúcou teplotou svetla rastie relatívny optický výkon modrej zložky svetla (neutral white – 4 100 K) a pri studenom bielom svetle (6 500 K) opäť klesá podiel žltej farby na vytvorenom spektre.

Xenónové výbojky dosahujú farebnú teplotu svetla 4 100 – 5 500 K, čo znamená, že sa nachádzajú blízko hranice neutrálneho a studeného svetla, resp. svietia studeným svetlom. Halogénové žiarovky majú teplotu svetla v rozmedzí približne 3 200 – 5 000 K, zvyčajne sa však nachádzajú v pásme neutrálneho bieleho svetla. LED teda dokážu pokryť teplotu bieleho svetla obidvoch zdrojov, dokonca ponúkajú viac možností.

### 3.2.3 Elektrické vlastnosti LED

Jednou z hlavných predností LED v automobiloch je úspora energie pri ich prevádzke. Typické operačné napätie bielej LED, pri ktorej sa využíva konverzia luminoforom je rovnaké ako operačné napätie modrej LED, t.j. 2,5 – 3,7 V, výrobcovia však zvyčajne konštruujú LED pre napätie 3,0 – 3,5 V.

Hodnoty elektrického prúdu pri LED zvyčajne nie sú napevno stanovené, výrobcovia obvykle uvádzajú hodnotu nominálneho elektrického prúdu, pri ktorom svoje LED testujú a určujú tak ich optické vlastnosti. Tento prúd je zvyčajne 350 mA, alebo 700 mA. Výrobcovia bielych LED takisto vo svojich katalógových listoch uvádzajú tzv. P/I charakteristiku, ktorá hovorí o závislosti optického výkonu na veľkosti elektrického prúdu, viz. Obrázok 3.2, na ktorom je zobrazená P/I charakteristika LED Seoul Z5 SZW05A0A [11]:



Obrázok 3.2: P/I charakteristika Seoul Z5 SZW05A0A

Na vodorovnej osi je uvedený elektrický prúd, na zvislej potom relatívny svetelný tok vyjadrený v percentách. Ako môžeme z grafu pozorovať, nominálny prúd tejto LED je 350 mA, a relatívny svetelný tok pri nej dosahuje hodnotu 100%. Z rastúcim prúdom rastie aj svetelný výkon, avšak tento rast je na úkor životnosti LED, vyššej spotreby energie a rastu požiadavku na chladenie LED.

Pri klesajúcom elektrickom prúde zase dochádza k poklesu svetelného výkonu, čo znamená, že pre dosiahnutie určitého svetelného toku musí byť použitých viac LED, čo zase

zvyšuje nároky na riadiacu elektroniku a ekonomickú stránku využitia LED pre konkrétnu aplikáciu.

Porovnanie elektrických parametrov LED s ostatnými druhmi zdrojov svetla nie je v tomto prípade možné, keďže LED sa používajú zvyčajne v sústavách. Navyše, účel týchto sústav často krát zastáva niekoľko funkcií (napríklad denné svietenie a obrysové svetlá), preto by prípadné porovnávanie energetickej náročnosti nebolo na mieste a bolo by veľmi komplikované.

### 3.3 Ostatné parametre LED

Medzi ostatné parametre bielych LED pre automobilový priemysel môžeme zaradiť ich rozmery, životnosť a cenu.

Rozmery LED sa líšia v závislosti od výrobcu. Pre lepšiu ilustráciu sú rozmery LED uvedené v Tabuľke 3.3 [7], [11], [12], [6]:

*Tabuľka 3.3: Rozmery vybraných LED*

Výrobca	Model	Rozmery dxšxv [mm]
Seoul	Z5	3,5×3,5×2
Nichia	NJSW172	3×3×0,8
Philips	Rebel	4,6×3,2×2,1
Osram	LW W5SN	7,2×6,2×1,9

Životnosť LED je závislá hneď na niekoľkých parametroch, ako je elektrický prúd, pri ktorom je LED používaná, kvalita chladiacej sústavy LED, vystavenie LED rôznym teplotám vonkajšieho prostredia, vystavenie vlhkému prostrediu a pod. Všetky tieto faktory značne ovplyvňujú životnosť LED, preto môžeme ich životnosť porovnávať len na základe údajov poskytnutých výrobcami v katalógových listoch.

V nasledujúcej Tabuľke 3.4 je uvedená maximálna životnosť LED pri optimálnych prevádzkových podmienkach [7], [11], [6]:

*Tabuľka 3.4: Životnosť vybraných LED*

Výrobca	Model	Životnosť [h]
Seoul	Z5	50 000+
Philips	Rebel	60 000
Osram	LW W5SN	100 000

Z tejto tabuľky môžeme usúdiť, že životnosť LED používaných v automobiloch je pri ideálnych podmienkach vyššia ako 50 tisíc hodín svietenia, čo predstavuje takmer 6 rokov

sústavného svietenia. Vzhľadom na to, že väčšina áut nejazdí 24 hodín denne, pri aplikácií sa môže životnosť osvetlenia z LED ešte zvýšiť. Napriek tomu, že výrobca Nichia neudáva presnú životnosť, prípady nasadenia z praxe ukazujú, že životnosť jeho výrobkov je podobná životnosti výrobkov konkurencie.

V porovnaní s halogénovými a xenónovými žiarovkami je životnosť LED rádovo vyššia. Pri optimálnych podmienkach sa životnosť xenónových žiaroviek pohybuje okolo 3 000 hodín, pri halogénových žiarovkách je táto hranica ešte nižšia, približne 2 000 hodín. [6]

Porovnávať cenu jednotlivých LED je mimo rozsahu tejto práce, keďže cena je veľmi závislá na množstve odberaných kusov, dostupnosti LED pre jednotlivé obchody, geografickej lokácii kupujúceho a pod. Všeobecne však môžeme tvrdiť, že cena vysokosvietivých LED používaných v automobilovom priemysle je o niečo vyššia ako cena klasických LED, ktoré sa používajú napríklad na signalizáciu.

Porovnanie ceny LED a iných zdrojov svetla v automobile takisto nie je práve na mieste, keďže by bolo potrebné vypočítať náklady nielen na kúpu jednej LED, ale aj na jej montáž a pod. Obecne však môžeme povedať, že v dnešnej dobe sú vozidlá s kompletným predným LED svietením drahšie, ako vozidlá s halogénovými či xenónovými svetlami.

Len pre ilustráciu, Audi A8 má v príplatkovej výbave LED svietenie za 2 024 € ktoré obsahuje LED svetlomety, asistent diaľkových svetiel a odbočovacie svetlo [13]. BMW X6 má túto možnosť za príplatok 2 218 € [14]. V ostatných automobilkách sa čoraz častejšie nasadzujú LED do funkcie denného svietenia a často je táto funkcia súčasťou základnej výbavy vyšších verzií osobných automobilov.

---

## 4 Legislatíva upravujúca farbu bieleho svetla

### 4.1 CIE 1931

CIE 1931 (známe aj ako CIE XYZ) je jeden z prvých matematicky definovaných farebných priestorov. Bol definovaný v štúdií o vnímaní farieb vytvorenej medzinárodným úradom Commission Internationale de l'éclairage (CIE) v roku 1931. Vychádza zo špecifikácie zvanej CIE RGB. [15]

CIE 1931 definuje farby pomocou troch parametrov:

- parameter Y vyjadruje jas,
- parametre x a y vyjadrujú vlastnú farbu.

Tieto odvodené parametre je možné vypočítať z trichromatických zložiek X, Y a Z. [15]

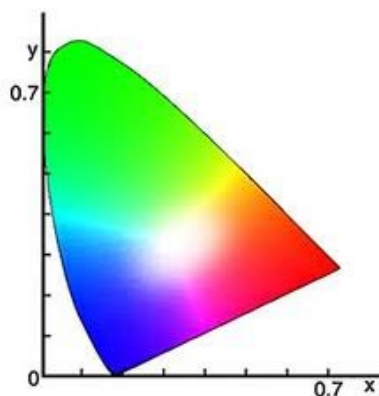
Jednotlivé zložky je možné vypočítať podľa nasledujúcich vzťahov:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4.1)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (4.2)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (4.3)$$

Pri klasifikácii LED do farebných binov výrobcovia v katalógových listoch uvádzajú súradnice x a y. Tieto súradnice sa vzťahujú na tzv. farebný priestor CIE xy, ktorý je možné vidieť na Obrázku 5.1 [16]:



Obrázok 4.1: Farebný priestor podľa CIE 1931

Výrobcovia v katalógových listoch takisto uvádzajú hodnotu svetelného toku. Ako bolo spomenuté vyššie, parameter svetelného toku predstavuje v CIE 1931 parameter Y. Pre získanie kompletných súradníc X, Y a Z z parametrov katalógového listu je možné použiť nasledujúce vzťahy:

$$X = x \times \frac{Y}{y} \quad (4.4)$$

$$Y = \phi \quad (4.5)$$

$$Z = \frac{Y}{y} \times (1 - x - y) \quad (4.6)$$

kde  $x$  a  $y$  predstavujú súradnice bodu vo farebnom priestore a  $\phi$  predstavuje hodnotu svetelného toku. Pre lepšiu ilustráciu, keď zvolíme LED, ktorá má parametre  $\phi = 74$  lm,  $x = 0,4753$ ,  $y = 0,4263$ , hodnoty  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  budú podľa vzťahov (4.4), (4.5) a (4.6) nasledujúce:

$$X = 0,4753 \times \frac{74}{0,4263} = 82,5057$$

$$Y = 74$$

$$Z = \frac{74}{0,4263} \times (1 - 0,4753 - 0,4263) = 173,5866 \times 0,0984 = \underline{\underline{17,0809}}$$

Prevod katalógových parametrov na parametre normy CIE 1931 je dôležitý najmä pri kombinácii viacerých LED z rôznych farebných binov.

Väčšina medzinárodných noriem, ktoré pojednávajú o zdrojoch svetla pre automobilový priemysel používajú pri definícii farieb zdrojov práve normu CIE 1931, avšak odvolávajú sa len na farebné súradnice  $x$  a  $y$ .

## 4.2 Predpisy Európskeho hospodárskeho spoločenstva

Predpisy EHK (anglická skratka je akronymom Economic Commission for Europe – ECE) boli pre účely tejto diplomovej práce poskytnuté v českom znení spoločnosťou Varroc Lighting Systems.

Podľa predpisov EHK sa však neriadia len členské štáty Európskej únie, alebo európskeho kontinentu. Sú vzorom miestnych predpisov napr. v Austrálii, na Novom Zélande, alebo v štátoch Juhoafrickej únie.

Predpisy EHK týkajúce sa svetiel a svetelných funkcií sú označované ako „Jednotné ustanovenia pre homologizáciu ...“, za čím nasleduje popis, čím sa daný predpis zaoberá. Tieto predpisy sú pre lepšiu prehľad a orientáciu číslované. V nasledujúcom zozname sú uvedené čísla predpisov, ktoré sú dôležité z hľadiska vývoja svetelných funkcií automobilov a pole ich pôsobnosti:

- EHK 3 – Odrazky pre motorové vozidlá a ich prípojné vozidlá,
- EHK 4 – Osvetlenie zadných registračných tabuliek motorových vozidiel a ich prípojných vozidiel,
- EHK 6 – Smerové indikátory motorových vozidiel a ich prípojných vozidiel,
- EHK 7 – Predné a zadné obrysové svetlá, brzdové svetlá a doplnkové obrysové svetlá motorových vozidiel (s výnimkou motocyklov) a ich prípojných vozidiel,
- EHK 19 – Predné hmlové svetlomety motorových vozidiel,
- EHK 23 – Spätné svetlomety a manévrovacie svetlomety motorových vozidiel a ich prípojných vozidiel,
- EHK 37 – Žiarovky pre použitie v homologovaných celkoch svetiel/svetlometov motorových vozidiel a ich prípojných vozidiel,

- EHK 38 – Zadné hmlové svetlá motorových vozidiel a ich prípojných vozidiel,
- EHK 48 – Montáž zariadení pre osvetlenie a svetelnú signalizáciu,
- EHK 87 – Denné svetlá motorových vozidiel,
- EHK 98 – Svetlomety pre motorové vozidlá vybavené výbojkovými zdrojmi svetla,
- EHK 112 – Svetlomety motorových vozidiel, ktoré vyžarujú asymetrické stretávacie svetlo alebo diaľkové svetlo alebo oboje a ktoré sú vybavené žiarovkami a/alebo LED modulmi,
- EHK 119 – Rohové svetlomety motorových vozidiel.

Farby jednotlivých svetelných funkcií, a definície týchto farieb definuje predpis EHK 48. Povinné farby svetelných funkcií sú pre lepší prehľad uvedené v nasledujúcej Tabuľke 4.1 [16]:

*Tabuľka 4.1: Farby vybraných svetelných funkcií*

<b>Funkcia</b>	<b>Farba</b>
Diaľkový, stretávací a spätný svetlomet, tabuľa pre osvetlenie zadnej registračnej tabuľky, predné obrysové a denné svetlo	Biela
Smerové svetlo, varovný signál, výstražný signál nebezpečenstva nárazu pre vzhľad idúce vozidlo	Oranžová
Brzdové a zadné obrysové svetlo, zadná odrazka iná než trojuholníková, zadná odrazka trojuholníková	Červená
Predný hmlový svetlomet	Biela alebo selektívna žltá
Parkovacie svetlo	Biela vpredu, červená vzadu
Bočné obrysové svetlo	Oranžová

Farby svetla sú rozdelené do troch kategórií, pričom farby svetiel v každej kategórii sú definované pomocou medzí plôch, ktoré ležia v chromatickom diagrame CIE 1931 (CIE xy). Farba svetla je definovaná pre farbu svetla, ktoré je vyžarované zariadením, nočnú farbu svetla zariadenia so spätným odrazom s výnimkou pneumatík so spätným odrazom a dennú farbu svetla zariadenia so spätným odrazom. V rámci diplomovej práce sa budeme zaoberať len prvou kategóriou, t. j. farbou svetla, ktoré je vyžarované zariadením.

Biela znamená farebné súradnice x, y vyžarovaného svetla, ktoré leží vo farebnej ploche definovanej medzami:

$$y=0,150 + 0,640x$$

$$y=0,440$$

$$x=0,500$$

$$y=0,382$$

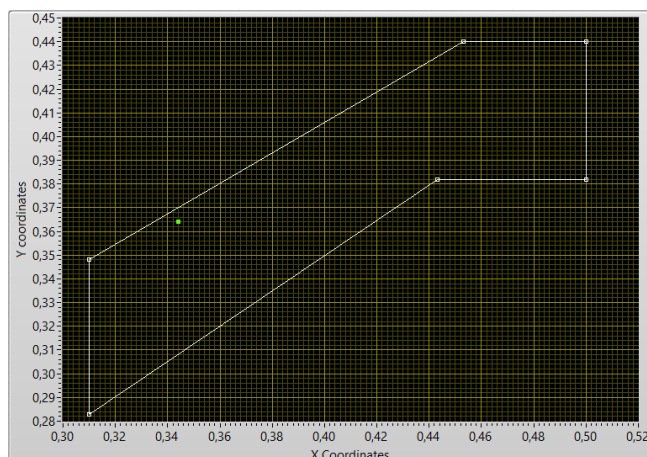
$$y=0,050 + 0,750$$

$$x=0,310 [16]$$

a priesečníkmi

x	0,310	0,453	0,500	0,500	0,443	0,310
y	0,348	0,440	0,440	0,382	0,382	0,283

Výsledná plocha má teda tvar, ktorý je ilustrovaný na Obrázku 4.2:



Obrázok 4.2: Definícia bieleho svetla podľa EHK 48

V praxi to znamená, že všetky svetelné funkcie, ktoré majú povinnosť vyžarovať biele svetlo musia pri homologizácii preukázať, že farba nimi vyžarovaného svetla spadá do tejto oblasti.

### 4.3 Predpisy Čínskej ľudovej republiky

Predpisy Čínskej ľudovej republiky majú podobnú štruktúru ako predpisy EHK. Sú rozdelené na niekoľko dokumentov:

- GB 4599-2007 – Svetlomety motorových vozidiel vybavené vlákňovými žiarovkami,
- GB 4660-2007 – Predné hmlové svetlomety motorových vozidiel vybavené vlákňovými žiarovkami,
- GB 4785-2007 – Inštalácia externého osvetlenia a svetelných signalizačných zariadení motorových vozidiel a ich prívesov,
- GB 5920-2008 – Fotometrické charakteristiky predných a zadných pozičných svetiel, obrysových svetiel a brzdoých svetiel pre motorové vozidlá a ich prívesy,
- GB 11554-2008 – Fotometrické charakteristiky zadných hmlových svetiel pre motorové vozidlá a ich prívesy,
- GB 11564-2008 – Odrazky pre motorové vozidlá,
- GB 15235-2007 – Fotometrické charakteristiky spätných svetiel pre motorové vozidlá a ich prívesy,
- GB 17509-2008 – Fotometrické charakteristiky indikátorov zmeny smeru pre motorové vozidlá a ich prívesy,



- GB 18099-2000 – Fotometrické charakteristiky bočných obrysových svetiel pre motorové vozidlá a ich prívesy,
- GB 18408-2001 – Fotometrické charakteristiky zariadení pre osvetlenie zadnej registračnej tabuľky motorových vozidiel a ich prívesov,
- 18409-2001 – Fotometrické charakteristiky parkovacích svetiel pre motorové vozidlá,
- GB 21259-2007 – Svetlomety vybavené výbojkovými zdrojmi svetla pre motorové vozidlá,
- GB 23255-2009 – Fotometrické charakteristiky svetiel denného svietenia pre motorové vozidlá,
- Automobilové predné svetlomety s LED svetelnými strojmi a/alebo LED modulmi.

Oblasť bielej farby definuje norma GB 4785-2007 podobne ako predpis EHK 48. Nedefinuje však hranice oblasti, ale oblasť samotnú:

$$\begin{array}{ll} x \geq 0,310 & y \leq 0,440 \\ x \leq 0,500 & y \geq 0,050 + 0,750x \\ y \leq 0,150 + 0,640x & y \geq 0,382 \text{ [17]} \end{array}$$

Výsledná oblasť je teda plocha, nie rovinný útvar, ako je to pri predpisoch Európskej hospodárskej komisie. Tvar tejto plochy je však zhodný s tvarom útvaru definovaným predpisom EHK.

Predpisy Čínskej ľudovej republiky boli takisto poskytnuté spoločnosťou Varroc Lighting Systems.

#### 4.4 Predpisy Spojených štátov amerických

Predpisom FMVSS 108 sa neriadia len členské štáty USA, ale aj Kanada. Keďže ide o zákon, tento dokument je voľne šíriteľný, avšak spoločnosť Varroc Lighting Systems pre túto diplomovú prácu poskytla jeho aktuálnu verziu z roku 2008. Zákon FMVSS 108 vychádza z predpisov SAE.

FMVSS 108 predstavuje len jeden dokument, na rozdiel od predpisov EHK a Čínskej ľudovej republiky. Orientácia v ňom je preto o niečo náročnejšia. Fotometrické charakteristiky jednotlivých funkcií sú popísané v tabuľkách IV-a až XX tohto dokumentu.

O farbe svetiel hovorí časť S14.4.1.4.2, o bielej farbe konkrétne S14.4.1.4.2.3. Definuje ju znova ako oblasť ohraničenú krivkami, avšak na rozdiel od predpisov EHK, zákon FMVSS 108 nedefinuje priesečníky jednotlivých kriviek.

$$\begin{array}{ll} y = 0,150 + 0,640x & y = 0,382 \\ y = 0,440 & y = 0,050 + 0,750x \\ x = 0,500 & x = 0,310 \text{ [18]} \end{array}$$

---

## 5 Aplikácie LED v automobilovom priemysle

Pri tvorbe svetelných funkcií je používaných niekoľko spôsobov použitia svetla z LED. V nasledujúcich podkapitolách si vysvetlíme niekoľko najpoužívanejších postupov pri tvorbe svetelných funkcií v automobiloch.

### 5.1 Svetlovody

Svetlovody sú v dnešnej dobe veľmi populárny dizajnový prvok automobilov. Sú používané ako na funkciu denného svietenia, tak na rôzne signalizačné funkcie (obrysové/brzdové svetla a pod.). Ich výhodou je možnosť priestorovo rozložiť svetlo tak, aby došlo k zvýrazneniu dôležitých štylistických prvkov pri dosiahnutí homogénneho vzhľadu svetla, ako ilustruje predné svetlo automobilu Audi A6 modelovej rady 2012 na Obrázku 5.1 [19].



Obrázok 5.1: Svetlovod automobilu Audi A6 2012

Ako zdroje svetla sú tu zvyčajne používané LED. Výhodou LED ako zdroja svetla pre svetlovody sú predovšetkým ich malé rozmery a smerová výstupná charakteristika. Vďaka tomu je účinnosť naviazania svetla do svetlovodov z LED oveľa účinnejšia v porovnaní so žiarovkou. Ďalšou nespornou výhodou je, že LED generuje v smere žiarenia oveľa menej tepla, nie je preto potrebný žiadny tepelný filter.

Svetlovod vedie svetlo naviazané zo zdroja k bodu, prípadne sústave zdrojov, pričom dochádza k minimálnym energetickým stratám. Vedenie svetla je založené na princípe totálneho odrazu. Ako materiál na výrobu svetlovodov je využívaný plast, prípadne kremičité sklo.

Svetlo, ktoré je naviazané do svetlovodu sa šíri po jeho optickej ose, pričom využíva totálny odraz na valcových stenách. V mieste, kde je porušená podmienka totálneho odrazu, je časť svetla vyviazaná mimo svetlovod smerom k pozorovateľovi. Porušenie podmienky odrazu

a vyviazanie svetla sa uskutočňuje pomocou zubov alebo vrypov. Homogénny vzhľad celého svetlovodu je dosiahnutý pomocou zámerného umiestnenia sústavy zubov alebo vrypov.

Z teórie totálneho odrazu je známe, že nastáva na rozhraní dvoch prostredí s odlišnou hodnotou indexu lomu. Ak sa lúč svetla šíri z prostredia s vyšším indexom lomu do prostredia s nižším indexom lomu pod uhlom  $\alpha$ , ktorý je väčší ako kritický uhol  $\alpha_c$ , nastáva na tomto rozhraní totálny odraz a celá energia svetelného lúča sa vracia späť do prostredia s vyšším indexom lomu.

Hodnota kritického uhlu  $\alpha_c$  je daná vzťahom:

$$\alpha_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (5.1),$$

kde  $n_1$  predstavuje prostredie s vyšším indexom lomu a  $n_2$  prostredie s nižším indexom lomu. V prípade svetlovodov používaných v automobilovom priemysle sa hodnota indexu lomu pre väčšinu materiálov pohybuje okolo hodnoty 1,5 a svetlovod je obklopený vzduchom s hodnotou indexu lomu 1,00026.

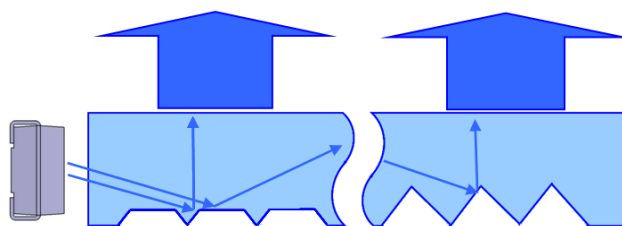
Po dosadení týchto hodnôt do vzťahu (5.1):

$$\alpha_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{1,00026}{1,5} \right) = \sin^{-1} 0,66684 = 0,72996 = 41,82^\circ$$

zistujeme, že ak lúč svetla dopadne pod uhlom väčším ako  $42^\circ$ , je vrátený späť do pôvodného prostredia.

Ako bolo spomenuté vyššie, k vyviazaniu lúča zo svetlovodu dochádza pri porušení podmienky totálneho odrazu pomocou sústavy zubov. Pri dopade lúča na vyvážajúci zub je tento lúč pomocou totálneho odrazu vyviazaný smerom k protiľahlej valcovej ploche. Na tejto ploche dochádza k lomu lúča a svetelný lúč opúšťa svetlovod. Sústava zubov je pritom navrhnutá tak, aby smer vyviazaného svetla bol presne definovaný. Sústava zubov a ich správne natočenie voči ose svetlovodu zaručujú, že sa ním šíri nielen svetlo zo zdroja, ale aj svetlo odrazené od stien svetlovodu.

Pri návrhu sústavy zubov je dôležité, aby jednotlivé zuby nielen posielali svetlo do správneho smeru, ale aj rozdelili energiu svetla tak, aby celý svetlovod svietil rovnomerne. Obvyčajne sú teda zuby na strane svetelného zdroja veľmi malé (v rade desiatín milimetra) a ich hĺbka a šírka postupne narastajú. Vzdialenosti medzi vrcholkami zubov sú konštantné. Medzery medzi malými zubami na strane zdroja svetla sú vyplnené rovnou plochou, na ktorej dochádza k totálnemu odrazu svetla, čo napomáha k šíreniu svetla svetlovodom a rovnomernému rozloženiu výstupného svetla, viz. Obrázok 5.2.

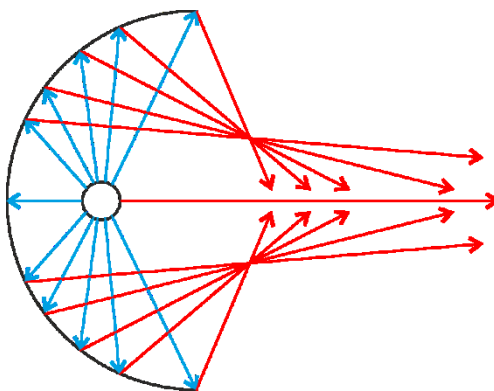


Obrázok 5.2: Typický tvar zubov na začiatku a konci svetlovodu

## 5.2 Reflektory

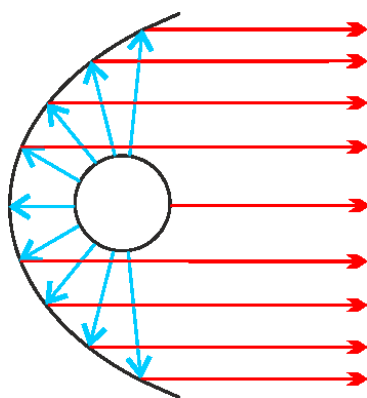
Reflektory sú svetelne činné časti svetidiel, ktoré menia priestorové rozloženie svetelného toku, pričom využíva odraz svetla. Sú vyrábané zvyčajne z plastu, na ktorý je nanesený reflexný materiál, napr. tenká vrstva hliníku. Geometrický tvar, veľkosť svetelného zdroja a tvar reflektoru určujú, ako sa svetlo bude od povrchu reflektoru odrážať a aký charakter bude mať vyžarované svetlo. [20]

Základné tvary, ktoré môže reflektor mať je guľový, eliptický, alebo parabolický. U guľového reflektoru s bodovým zdrojom svetla (napríklad LED), ktorý je umiestnený v optickom strede sústavy sa časť svetelných lúčov dopadajúcich na reflektor v blízkosti jeho osy odrazí takmer rovnobežne s touto osou. Ostatné lúče sa odrazia v smeroch znázornených na Obrázku 5.3:



Obrázok 5.3: Guľový reflektor so zdrojom umiestneným mimo geometrický stred reflektoru

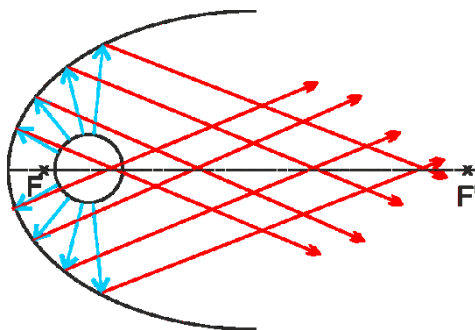
V prípade, že je zdroj svetla umiestnený do geometrického stredu guľového reflektoru, lúče odrazené od povrchu reflektoru sa vracajú späť smerom k zdroji svetla. V automobilovom priemysle sa častejšie využívajú parabolické reflektory, ktoré odrážajú dopadajúce svetelné lúče tak, že sa po odraze šíria rovnobežne, ako ilustruje Obrázok 5.4:



Obrázok 5.4: Parabolický reflektor

Parabolické reflektory sú často požívané spolu s fazetami. Takéto reflektory sú tvorené veľkým množstvom malých plôch, ktoré na seba nadväzujú. Tieto fazety môžu byť buď rovinné, alebo priestorové.

Ďalším typom reflektoru ktorý je v praxi často využívaný je elipsoidný reflektor. Smer odrazených lúčov je pri tomto type reflektoru závislý na pozícii zdroja svetla. V prípade, že je zdroj umiestnený v ohnisku elipsy, prechádzajú odrazené lúče druhým ohniskom elipsy. Posunutie zdroja pred, alebo za ohnisko elipsy spôsobí zmenu smeru odrazených lúčov. Na Obrázku 5.5 je možné vidieť elipsoidný reflektor, v ktorom je zdroj svetla umiestnený pred ohniskom elipsy [20]:



Obrázok 5.5: Elipsoidný reflektor so zdrojom pred ohniskom elipsy

V praxi sa často využívajú aj kombinácie niekoľkých typov reflektorov, napríklad guľových a parabolických.

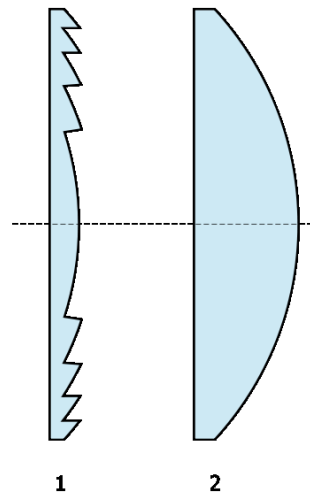
### 5.3 Šošovky

Veľmi často používanou optickou komponentou pri vývoji svetelných funkcií v automobiloch je šošovka. Úlohou šošovky je zmeniť priestorové rozloženie svetelného toku lomom lúčov svetla. Najrozšírenejšie šošovky pre LED vytvárajú rotačne symetrickú plochu svietivosti, pri ktorej je svetelný tok koncentrovaný do užšieho svetelného zväzku. Často sa takisto využívajú šošovky, ktoré rozširujú a výrazne menia charakter vyžarovania LED vo všetkých smeroch.

Šošovky sa však nechovajú ideálne. Okrem iných chýb a deformácií svetla tvoria tzv. chromatickú aberáciu (farebnú chybu). Táto chyba je spojená s tým, že ohnisková vzdialenosť šošovky závisí na indexu lomu materiálu, z ktorého je šošovka vyrobená. Fyzikálnou podstatou tohto javu je závislosť indexu lomu na vlnovej dĺžke svetla. Keďže biele svetlo LED v automobilovom priemysle je zložené z dvoch rôznych vlnových dĺžok, každá zložka sa pri prechode šošovkou láme inak. Pri prechode svetla šošovkou teda dochádza k rozkladu svetla. Dôsledkom toho je, že okrajové časti svetla, ktoré prejde šošovkou, môžu mať mierne odlišnú farbu ako stred premietaného svetla. Odstránenie tejto zvyčajne nežiaducej vlastnosti šošoviek je možné vhodnou kombináciou spojných a rozptylných šošoviek, pričom vzniká tzv. achromatická svetelná sústava.

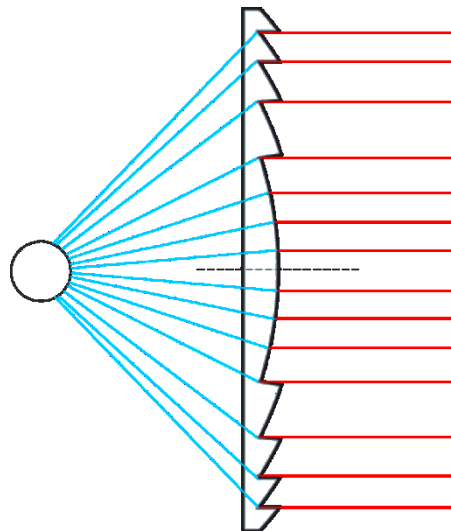
V automobilovom priemysle sa veľmi často používajú Fresnelove šošovky. Tieto šošovky sú na rozdiel od klasických šošoviek ľahšie a tenšie, pretože sú z nej odstránené časti, ktoré sa priamo nepodieľajú na lome lúčov svetla. Tým pádom je ušetrený materiál a klesajú náklady na výrobu takejto šošovky. Fresnelove šošovky menia smer lúčov z bodového zdroja svetla na rovnomerne sa šíriace svetelné lúče.

Rozdiel v tvare medzi Fresnelovou a klasickou šošovkou je ilustrovaný na Obrázku 5.6, kde obrázok 1 znázorňuje prierez Fresnelovou šošovkou a obrázok 2 prierez klasickou plankonvexnou (ploskovypuklou) šošovkou:



Obrázok 5.6: Porovnanie tvaru Fresnelovej a klasickej šošovky

Fresnelove šošovky menia smer lúčov z bodového zdroja svetla na rovnomerne sa šíriace svetelné lúče, ako ilustruje Obrázok 5.7:

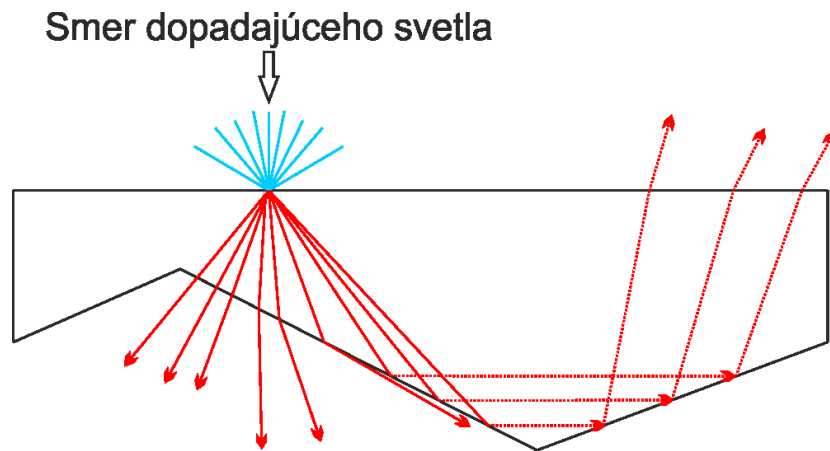


Obrázok 5.7: Princíp funkcie Fresnelovej šošovky

## 5.4 Refraktory

Refraktory patria medzi optické prvky, ktoré menia rozloženie svetelného toku pomocou lomu svetla. Pri refraktoroch sa, podobne ako pri svetlovodoch, okrem lomu svetla vyžíva aj úplný vnútorný odraz. V prípade, že nastane úplný vnútorný odraz, lúče svetla nie sú vyžiarené z refraktora smerom do vonkajšieho prostredia, ale späť do materiálu refraktoru. Lúče, ktoré nespĺňajú podmienku úplného vnútorného odrazu sú vyžiarené smerom z refraktoru do prostredia. [20]

Princíp refraktoru je znázornený na Obrázku 5.8:



*Obrázok 5.8: Princíp funkcie refraktoru*

Refraktory bývajú často používané s inými optickými súčiastkami, ako napríklad šošovkami, alebo kolimátormi. Sú ďalšou možnosťou na tvorbu zaujímavých optických prvkov automobilov, ktoré často plnia aj dizajnovú funkciu. Príkladom je automobil Range Rover Evoque, ktorého predný svetlomet z rozsvieteným denným svietením, ktoré je založené práve na princípe refraktoru môžeme vidieť na Obrázku 5.9:

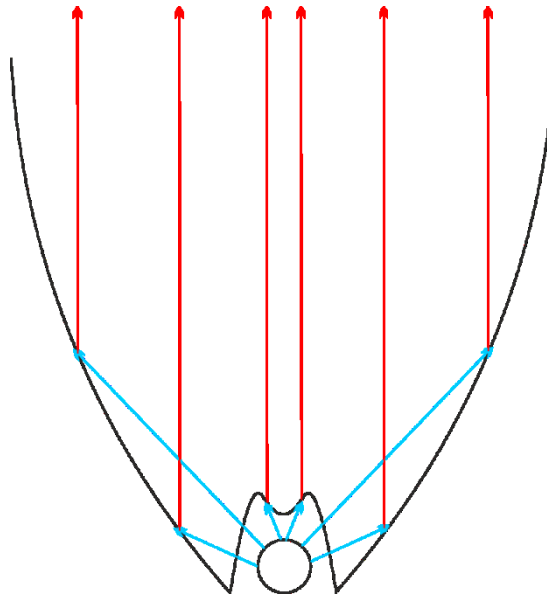


*Obrázok 5.9: Denné svietenie vozidla Range Rover Evoque postavené na refraktore*

## 5.5 Kolimátory

Kolimátory sú v podstate postavené na princípe parabolických reflektorov. Ich úlohou je sústrediť svetlo z bodového zdroja a zmeniť smer šírenia lúčov na rovnobežné lúče. Základňa kolimátoru je upravená tak, aby sa svetlo zo zdroja, ktorý je zvyčajne umiestnený za kolimátorom, šírilo vždy rovnakým smerom.

Princíp funkcie kolimátora zobrazený na Obrázku 7.10:



Obrázok 5.10: Princíp funkcie kolimátoru

Z obrázku vidíme, že nech sa lúč zo zdroja svetla šíri akýmkoľvek smerom, z kolimátora vystupuje vždy pod požadovaným uhlom. Na obrázku je zobrazený ideálny kolimátor, zmenou sklonu bočnej strany môžeme dosiahnuť fokusáciu svetla do požadovaného bodu, prípadne požadovaného uhlu.



---

## 6 Problematika farebných binov

### 6.1 Triedenie LED do binov

Triedenie LED do binov je zavedené pre efektívnejšiu výrobu LED. Tento proces je však najdôležitejší pre výrobcov osvetľovacej techniky, ktorí tak majú možnosť kontrolovať ako farbu vyžarovaného svetla, tak aj znižovať náklady a šetriť čas pri vývoji. Užšie špecifikujú jednotlivé parametre konkrétnej LED, čo je výhodné pri tvorení LED modulov alebo pri spájaní niekoľkých LED do jedného funkčného celku.

Pre lepšie porozumenie triedenia LED do binov je vhodné poznať výrobný proces LED. Ako bolo spomenuté v predchádzajúcich kapitolách, v automobilovom priemysle sa ako zdroj bieleho svetla používajú LED využívajúce konverziu modrého svetla pomocou vrstvy luminoforu. Hrúbka tejto vrstvy určuje výslednú farbu vyžarovanú LED.

Pri výrobe LED je použitý jednoduchý substrát, ktorý je pokrytý rozličnými materiálmi (využitím epitaxie – procesu, pri ktorom na povrchu substrátu rastie tenká kryštalická vrstva). Tým je vytvorený polovodič, ktorý formuje jadro modrej LED. Tento polovodič je následne narezaný na veľmi malé kúsky. Následne sú vložené elektrické spoje (vývody) a pridaná vrstva alebo suspenzia fosforu do okolia. Táto zostava je zapuzdrená a tvorí tak bielu LED. [20]

Procesy vrstvenia (epitaxia a pridanie fosforu s hrúbkou v ráde stotín milimetra) vytvárajú značné prirodzené rozdiely vo vlastnostiach LED, ktoré ovplyvňujú svetelný tok, teplotu farby a napätie LED. Napriek snahe výrobcov o minimalizáciu týchto rozdielov, nie je možné vytvoriť vysoko konzistentnú a prísne kontrolovanú výrobu LED s rovnakými vlastnosťami. Z tohto dôvodu výrobcovia pristupujú k triedeniu LED do skupín s rovnakými vlastnosťami. Vznikajú tak biny rozdelené podľa farby, svetelného toku, a niekedy aj podľa napätia. To umožňuje výrobcovi osvetľovacej techniky vybrať len tie LED, ktoré presne zodpovedajú požiadavkám ich aplikácie.

### 6.2 Triedenie do binov podľa svetelného toku

Ako už bolo spomenuté vyššie, existuje niekoľko spôsobov, ako triediť LED do binov. Najvýznamnejšími kritériami delenia LED do binov sú ich svetelný tok a farebná teplota. Tieto parametre najviac ovplyvňujú pole nasadenia konkrétnej LED.

Triedenie LED podľa svetelného toku je veľmi jednoduchá lineárna funkcia. LED sú jednotlivo zamerané, a rozdelené podľa svetelného toku do predpísaných oblastí. Každý výrobca LED definuje svoje vlastnú sadu binov podľa svetelného toku a poskytuje tak jasné informácie o predpokladanom svetelnom toku každého svetelného binu. Tým pádom je možné, aby si výrobca svetelnej techniky mohol vybrať tie biny (alebo sady binov), ktoré sú pre neho najvhodnejšie z hľadiska požiadaviek jeho zákazníka, prípadne splňajú požiadavky na tvorenú funkciu.

### 6.3 Triedenie do binov podľa teploty farby

Triedenie LED do binov podľa teploty farby, ktorú LED vyžarujú je oveľa komplexnejšia problematika, ako triedenie do binov podľa svetelného toku.

Výrobcovia triedia LED do farebných binov podľa súradníc  $x$  a  $y$ , ktoré spadajú do normy CIE 1931. Jedná sa o súradnice chromatického diagramu, ktorý je znázornený na Obrázku 4.1.

Tieto biny sú tvorené zvyčajne štvoricou bodov, ktoré tvoria konvexný štvoruholník v chromatickom diagrame. Výnimkou však nie sú ani päť- či šesťuholníky, ktoré definujú oblasti binu. Veľkosť jednotlivých binov je daná kvalitou výroby – čím prísnejšia je kontrola spôsobu výroby a presnejšia výroba samotná, tým menšie farebné biny je výrobca schopný vyrobiť.

## 6.4 Značenie LED podľa binov

Každý výrobca definuje vlastné označenie LED. Toto značenie umožňuje za pomoci katalógového listu jednoducho a jednoznačne definovať parametre LED. Rozdielnosti v značení LED jednotlivých výrobcov si ukážeme na niekoľkých príkladoch.

### 6.4.1 Značenie LED výrobcu OSRAM

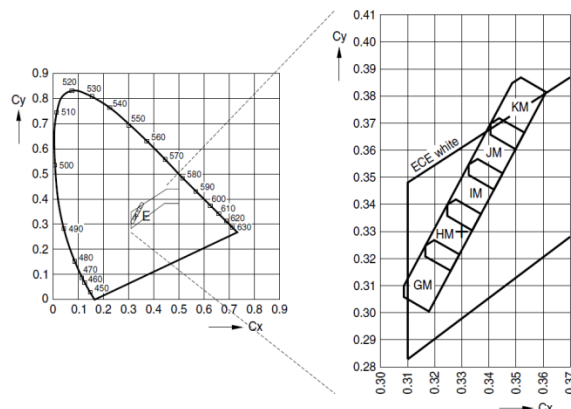
Od výrobcu OSRAM vyberme LED LE UW D1W4 01. Jedná sa o 4-chipovú LED. Výrobca deklaruje 6 binov svetelného toku, ako znázorňuje nasledujúca Tabuľka 6.1 [6]:

Tabuľka 6.1: Rozdelenie svetelných binov LED OSRAM LE UW D1W4 01

Označenie binu	Minimálny svetelný tok [lm]	Maximálny svetelný tok [lm]
5P	450	500
6P	500	560
7P	560	630
8P	630	710
5Q	710	800
6Q	800	900

Z tabuľky je zrejmé, že táto LED dokáže vyprodukovať svetelný tok v závislosti na bine od 450 až do 900 lumenov. Tento rozsah je dosť veľký, čo výborne ilustruje potrebu delenia LED do binov podľa svetelného toku.

Rozdelenie LED podľa farby vyžarovaného svetla ilustruje Obrázok 6.1:



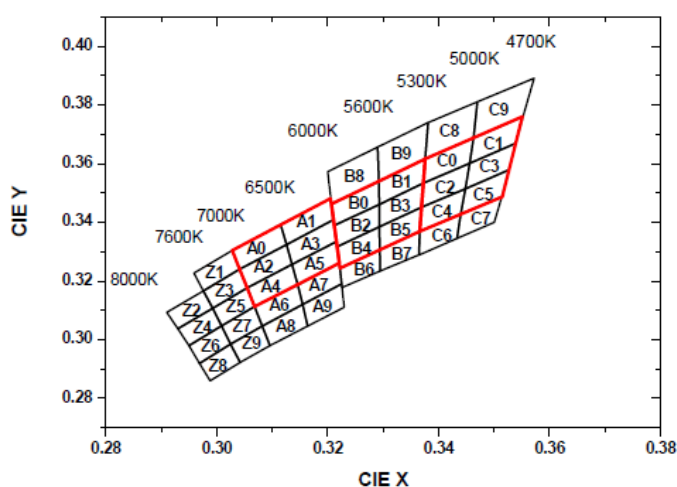
Obrázok 6.1: Farebné biny LED OSRAM LE UW D1W4 01

Na obrázku 6.1 teda vidíme, že výrobca delí túto LED do binov s označením GM, HM, IM, JM a KM. Definície súradníc jednotlivých binov je možné nájsť v aktuálnom katalógovom liste LED, viz. [6]. Charakteristiky tejto LED sú merané pri nominálnom prúde 700 mA.

Výrobca značí LED pomerne jednoducho, napr. 5P-GM, pričom znaky pred pomlčkou definujú bin podľa svetelného toku, a znaky za pomlčkou definujú bin podľa farby vyžarovaného svetla. Môžeme teda povedať, že táto LED mať hodnotu svetelného toku niekde v rozmedzí 450-500 lumenov a farba vyžarovaného svetla bude spadať do farebného binu GM. Z pozície farebného binu môžeme takisto povedať, že farba vyžarovaného svetla bude inklinovať k modrej farbe.

#### 6.4.2 Značenie LED výrobcu Seoul Semiconductor

Od výrobcu Seoul Semiconductor vyberieme LED Seoul Z5 s označením SZW05A0A. Výrobca pri tejto LED definuje 39 farebných binov, avšak len 18 z nich odpovedajú definícií bielej farby požadovanej medzinárodnými predpismi. Tieto biny sú na obrázku 6.2 ohraničené červenou farbou [11]:



Obrázok 6.2: Definícia farebných binov LED Seoul Z5 SZW05A0A

Z hľadiska svetelného toku výrobca rozdeľuje LED do 3 binov s označením U1, U2 a U3, pričom celkový rozsah svetelného toku je 91-118,5 lm. Výrobca rozdeľuje LED aj podľa elektrického napätia, a to do 4 kategórií: H, I, J a K, kde je rozpätie napätia od 3,0 V do 4,0 V; jednotlivé biny sú odstupňované vždy po 0,25 V.

Označenie LED U3C8I nám teda hovorí, že LED spadá do binu U3 z hľadiska svetelného toku (91-100 lm), farebné súradnice vyžarovaného svetla spadajú do binu C8 (teplé biele svetlo) a operačný prúd LED sa pohybuje v rámci binu I, t.j. 3,25-3,5 V. Všetky charakteristiky sú merané pri nominálnom prúde 350 mA.

#### 6.4.3 Značenie LED výrobcu Philips Lumileds

Pre ilustráciu značenia LED od značky Philips Lumileds použijeme radu LUXEON Rebel. Aktuálne informácie o tejto rade je možné nájsť na stránkach výrobcu, viz. [7].

Značenie LED LUXEON Rebel je mierne odlišné. Keďže séria Rebel zastrešuje LED niekoľkých farieb, používa zápis LED v tvare LXML – ABCD – EFGH, kde LXML značí označenie samotnej rady, a:

- A – uhol vyžarovania, (P pre Lambertovské rozloženie žiarenia),
- B – farba LED, W pre bielu, M pre zelenú, E pre tyrkysovú, B pre modrú, R pre kráľovskú modrú, D pre červenú, H pre oranžovo-červenú, L pre oranžovú,
- C – farebná varianta, 0 pre priamu farbu, C pre studenú bielu, N pre neutrálnu bielu, W pre teplú bielu,
- D – hodnota nominálneho prúdu, 1 pre 350 mA,
- E – rezervované pre budúce výrobky,
- F, G, H – minimálny svetelný tok v lm, alebo žiarivý tok v mW.

Toto značenie je však značenie samotných produktov, jednotlivé produkty sa ďalej špecifikujú podľa binov farebných, svetelného toku a napätia.

Pre biele LED LUXEON Rebel existuje 7 binov rozdelených podľa svetelného toku, ktoré sú označené písmenami G-N v rozmedzí 40-100 lm, s krokom po 10 lm. Z hľadiska farby, výrobca poskytuje dohromady 46 farebných binov, čo svedčí o prepracovanej technike výroby a presnosti pri výrobe. Označenie farebného binu obsahuje dva znaky, napr. Y0, alebo XM. Pre podrobnejšie informácie je vhodné navštíviť stránky výrobcu. Výrobca takisto delí LED podľa pracovného napätia do 7 binov. Tie majú označenie A-G a rozsah hodnôt od 2,31V do 3,99 V. Tento veľký rozsah je spôsobený rozličnými farbami LED v modelovej rade. Každá farba totiž používa iné napätie.

Označenie konkrétnej LED v závislosti na binoch má teda tvar ABCD, kde A značí bin podľa svetelného toku, B a C farebný bin a D bin podľa operačného napätia. Pre ilustráciu, LED označená ako NTPD má svetelný tok binu N (100 lm), patrí do farebného binu TP (neutrálna biela) a pracuje pri operačnom napätí podľa binu D (3,03-3,27 V).

---

## 7 Výsledky meraní

Zo zadania diplomovej práce vyplýva, že požiadavkou firmy Varroc Lighting System je overiť, či zadané LED spĺňajú predpokladané požiadavky ustanovené v katalógovom liste. Ďalším účelom meraní bolo overenie správnosti kalibrácie ich spektrometra a integračnej gule. Poslednou požiadavkou bolo stanovenie metodiky merania pre ich laboratórium s integračnou guľou. Navrhnutý postup merania je súčasťou Prílohy A.

### 7.1 Popis merania

Pri určovaní metodiky merania som postupoval na základe teoretických znalostí o meraniach so spektrometrom. Pri nastavovaní merania na spektrometri bolo dôležité uvedomiť si princíp jeho funkcie a závislosť integračného času na výkone konkrétnej LED.

Princíp snímania spektrometra by sa dal prirovnáť k princípu fotoaparátu. Pri meraní prechádza svetlo otvorenou clonkou spektrometra na fotodetektor, ktorý zaznamenáva prijaté údaje. Po ukončení merania sa clonka zatvorí, a spektrometer spracuje namerané hodnoty. Doba, počas ktorej je otvorená clonka spektrometru sa nazýva integračný čas. V prípade, že do integračnej gule je pripojená LED s vysokým optickým výkonom, je potrebné skrátiť integračný čas, nakoľko veľký svetelný výkon by mohol spektrometer oslniť a spôsobiť tak saturáciu fotodetektoru. Pri saturácii fotodetektor stráca svoju presnosť, a môže poskytovať značne skreslené a nepresné údaje. Naopak, pokiaľ je výstupný optický výkon LED malý, je potrebné nastaviť vyšší integračný čas, aby bolo na povrch fotodetektoru spektrometra prenesené dostatočné množstvo svetla. V prípade krátkeho integračného času a nízkej úrovni optického signálu sú výsledky merania opäť nepresné, pretože spektrometer nedostáva dostatok presných údajov na vyhodnotenie a pracuje mimo oblasti najväčšej presnosti.

Ovládací software spektrometrov obvykle umožňuje nastavenie optimálneho integračného času, čo bolo využité pri meraniach aj pri návrhu riešenia.

Keďže charakteristika farby môže byť v priestore nejednotná a skreslená, používajú sa pre merania kolorimetrických parametrov zariadenia nazývané integračné gule. Tieto zariadenia sú pasívne a v ich vnútri je plocha upravená na čo najvyššiu odrazivosť. Meranie prebehlo v celom spektre vlnových dĺžok viditeľných ľudským okom. [21]

Kompletné výsledky z meraní je možné nájsť v Prílohách B a C. V tejto kapitole budú uvedené len štatisticky spracované výsledky meraní jednotlivých LED. V rámci diplomovej práce bolo odmeraných 9 LED, pričom pri meraní chromatických súradníc bolo každé meranie na každom zariadení zopakované 30 krát. V rámci meraní boli merané vlastnosti LED vymenovaných v Tabuľke 7.1:

*Tabuľka 7.1: Zoznam meraných LED*

Označenie LED	Bin	Nominálny prúd [mA]	Teplota svetla
<b>Seoul SZW05A0A Z5</b>	U2C3H	350	Studená
<b>Seoul SZW05A0A Z5</b>	U2E7I	350	Neutrálna
<b>Seoul SZW05A0A Z5</b>	U3C8I	350	Studená
<b>Seoul SZW05A0A Z5</b>	U1D5H	350	Neutrálna
<b>Seoul SPW08F0D P8</b>	-	350	Studená
<b>Osram OSTAR LE UW D1W4 01</b>	JM	700	Studená
<b>Luxeon Rebel LXML PWN1 0100</b>	NTPD	350	Neutrálna
<b>Luxeon F CW Premium</b>	-	1 000	Studená
<b>Luxeon F CW ES</b>	-	700	Studená

Pri LED Luxeon F CW Premium a Luxeon F CW ES nie sú uvedené biny z toho dôvodu, že sa jedná o prototypy týchto LED, preto sú vyrábané len v sériách po niekoľkých kusoch. Pri LED Seoul P8 sa jedná o predvádzací kus, ktorý bol dodaný v sérii 10 kusov.

Všetky tri LED bez označenia binov mali definované konkrétne súradnice na základe ich poradového čísla v balení, bohužiaľ pri osádzaní týchto LED došlo k tomu, že ich poradové číslo nebolo vyznačené na doske, na ktorú boli osadené.

LED Luxeon F CW Premium a Luxeon F CW ES sú prototypy vyvíjané spoločnosťou Philips Lumileds, preto sú podrobné výsledky meraní týchto dvoch LED uvedené v samostatnej Tajnej časti tejto diplomovej práce kvôli ochrane ich parametrov a údajov o nich. Pre náhľad do tejto tajnej časti je potrebné kontaktovať autora tejto práce.

Merania prebiehali v temnej komore s rozmermi 2,6x3x2,5 m, ktorá sa nachádzala v laboratóriu CPIT A302 na Vysokej škole báňskej - Technickej univerzite Ostrava. Temná komora spolu s integračnou guľou minimalizovali ovplyvnenie merania svetlom z okolia. Jediným zdrojom svetla v tmavej komore bolo svetlo z obrazovky notebooku, jas osvetlenia obrazovky bol nastavený na minimum. Ďalšími zdrojmi svetla v miestnosti boli indikátory elektrického napätia a prúdu na laboratórnych zdrojoch, ale vzhľadom na intenzitu týchto zdrojov svetla sú zanedbateľné ako rušivé prvky.

Podrobný prehľad použitých prístrojov je uvedený v Tabuľke 7.2:

*Tabuľka 7.2: Zoznam prístrojov použitých pri meraní farebných súradníc LED*

Prístroj	Sériové číslo	Kalibrovaný	Popis a účel
<b>Agilent U1251A</b>	TW48090031	Áno	Multimeter, meranie elektrického prúdu pretekajúceho LED
<b>FLIR i7</b>	601032747	Áno	Termokamera, monitorovanie teploty na povrchu LED
<b>BK PRECISION power supply, Model No. 1791</b>	03060009	Nie	Vysoko prúdový (10 A) regulovateľný zdroj, napájanie a regulácia výkonu Peltierovho článku
<b>TEC1-12710 HT</b>	-	-	Peltierov článok, chladenie/zohrievanie LED
<b>Arctic Cooling Freezer 7 Pro</b>	-	-	Chladič, chladenie peltierovho článku
<b>Integračná guľa</b>	-	-	Zamedzenie vplyvu okolitého svetla na svetlo vyžarované LED
<b>Avantes AvaSpec-2048</b>	0608003S1	Nie	Spektrometer, meranie farebných súradníc LED
<b>DIAMETRAL laboratórny zdroj, typ P230R51D</b>	2136	Nie	Laboratórny zdroj, napájanie LED a chladiča
<b>Ocean Optics HG-1</b>	00-8-00000-STD	Áno	Ortuťovo-Argónový kalibračný zdroj svetla, overenie presnosti multimetra
<b>Avantes AvaLight-DHS</b>	LS-0603019	Nie	Deuterium-Halogénový zdroj svetla, vytvorenie kalibrácie pre meranie vyžarovacích charakteristík

Okrem klasických prístrojov potrebných pre meranie optických vlastností LED boli použité aj prvky ako Peltierov článok, termokamera a chladič. Peltierov článok je elektronický prvok, ktorý pri prietoku elektrického prúdu jednu stranu ochladí, a druhú zahrieva. Funguje na základe Peltierovho javu. V prípade, kedy Peltierov článok funguje opačne (dodaním rozdielnych teplôt na stykové plochy vodičov) sa jedná o tzv. Seebeckov jav. Nevýhodou Peltierovho článku je relatívne nízka účinnosť. Po pripojení elektrického prúdu sa jedna strana

začne zahrievať, a druhá strana začne chlaďiť. Pomer ohrievacieho a chladiaceho výkonu je zvyčajne v rozmedzí 1,5 – 2,5 pri nulovom rozdieli teplôt. Čím je rozdiel teplôt vyšší, tým je účinnosť nižšia a tento pomer sa znižuje. Pre účely všetkých experimentov bol použitý Peltierov článok TEC1-12710 HT, ktorý je možné napájať elektrickým napätím 15,8 V a elektrickým prúdom až 10 A. Chladiaci výkon tohto článku dosahuje maximálne 89 W.

Ako chladič pre Peltierov článok bol použitý chladič pochádzajúci z procesoru počítača. Šlo o chladič Arctic Cooling Freezer 7. Maximálne otáčky ventilátora môžu dosiahnuť podľa predajcu až 2500 otáčok za minútu, maximálny chladiaci výkon celého chladiča je až 200W. [23]

Pre monitorovanie teploty povrchu LED bola použitá termokamera FLIR i7. Kamera má rozlíšenie IR objektívu 140x140 pixelov, rozsah meraných teplôt od -20 do 250 °C (avšak bolo možné zmerať teplotu až -40 °C) a umožňuje merať teplotu v niekoľkých módoch (teplota bodu, maximálna teplota v oblasti, minimálna teplota v oblasti a pod.).

### 7.1.1 Kalibrácia spektrometra

Pred začiatkom meraní bolo potrebné skontrolovať kalibráciu spektrometra, overiť jeho presnosť a vytvoriť kalibračný súbor pre meranie vyžarovacej charakteristiky, ktorá je používaná pre vyhodnocovanie farebných súradníc.

Pre overenie presnosti spektrometra bol použitý kalibrovaný zdroj svetla Ocean Optics HG-1. Tento zdroj svetla bol kalibrovaný, a preto bolo možné pomocou neho overiť presnosť, prípadne skalibrovať spektrometer. Spektrometer a kalibračný zdroj svetla boli teda prepojené pomocou optického káblu s SMA koncovkami. Pri overovaní presnosti sa však ukázalo, že priemerná odchýlka spektrometra na všetkých vlnových dĺžkach vyžarovaných zdrojom je približne len 0,2 nm. Preto túto odchýlku pre účely meraní môžeme považovať za zanedbateľnú.

Nasledujúcim krokom pri meraniach bolo vytvorenie kalibračného súboru pre meranie vyžarovacej charakteristiky. Pre tento účel bol použitý kalibračný zdroj Avantes AvaLight DHS. Na CD priloženom pri tomto zdroji svetla bol obsiahnutý tzv. *lamp file*, súbor o zdroji svetla. Jedná sa o textový súbor s príponou .lmp, ktorý obsahuje dva stĺpce údajov – prvý stĺpec obsahuje údaje o vlnovej dĺžke, v druhom stĺpci je údaj o svetelnej intenzite na príslušnej vlnovej dĺžke. Zdroj nemal platnú kalibráciu, ale údajne nebol od svojho zakúpenia intenzívne využívaný. Napriek tomu som pristúpil k overeniu presnosti zdroja a to tak, že po zahriatí svetelného zdroja (podľa odporúčania výrobcu, t.j. 30 minút) boli spektrometer a zdroj svetla prepojené optickým káblom s SMA koncovkami. Ukázalo sa, že je naozaj veľmi pravdepodobné, že zdroj AvaLight-DHS nebol pravdepodobne používaný, pretože namerané hodnoty vlnových dĺžok a optického výkonu presne odpovedali hodnotám, ktoré boli uvedené v lamp file. Mohol som teda pristúpiť ku kalibrácii spektrometra pre meranie vyžarovacích charakteristík pomocou zdroja svetla AvaLight-DHS.

Kalibrácia spektrometra pre meranie vyžarovacích charakteristík prebieha nasledovne:

1. Spustíme zdroj svetla, ktorý je potrebné nechať pred kalibráciou zohriať, a to minimálne 30 minút. Pri zohrievaní musia byť zapnuté oba zdroje svetla (halogénový aj deutériový) a tlačidlo TTL musí byť vo vypnutej polohe. Toto



- tlačidlo slúži na ovládanie clony, a keď je v polohe ON, svetlo svieti zo zdroja smerom do vlákna. Pri vypnutej polohe svetlo neprechádza clonou.
2. Spektrometer je spojený so zdrojom svetla pomocou optického káblu. Následne je z menu aplikácie AvaSoft vybraná položka **Application** a **Absolute Irradiance Measurement**.
  3. Po uplynutí 30 minút prepne tlačidlo TTL na zdroji svetla do polohy ON.
  4. V novo otvorenom okne klikneme na **Perform Intensity Calibration**.
  5. Nastavíme priemer vlákna. V tomto prípade bol priemer vlákna 9  $\mu\text{m}$ .
  6. Klikneme na tlačidlo **Start Intensity Calibration**. Po tomto kroku je potrebné nastaviť integračný čas tak pomocou tlačidla **Auto configure integration time**.
  7. Klikneme na biele tlačidlo **Save Reference**. Biela čiara naznačuje referenčné spektrum.
  8. Vypneme zdroj svetla prepnutím tlačidla TTL do polohy OFF.
  9. Počkáme, kým spektrum spadne a stane sa z neho rovná čiara. Stlačíme čierne tlačidlo **Save Dark**.
  10. Uložíme kalibráciu pomocou tlačidla **Save Calibration**. V závislosti na modeli spektrometra je možné kalibračný súbor uložiť priamo do vnútornej pamäte zariadenia EEPROM, alebo ho exportovať ako kalibračný súbor, ktorý môže byť uložený na pevnom disku PC, na ktorom je ovládací software spektrometra nainštalovaný.
  11. Pri ďalšom spustení merania vyžarovacej charakteristiky nie je potrebné vykonávať kalibráciu nanovo, stačí ju načítať z pamäte zariadenia, alebo z kalibračného súboru.

## 7.2 Stanovenie hypotéz

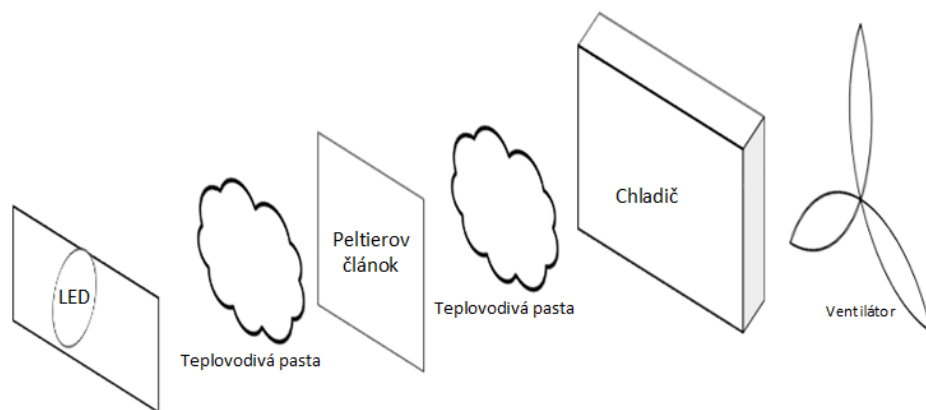
Merania boli zostavené tak, aby bolo možné potvrdiť, alebo vyvrátiť nasledujúce hypotézy:

- Hypotéza č. 1: Hodnoty farebných súradníc sa menia pri rastúcej teplote P-N prechodu.
- Hypotéza č. 2: Svetelné spektrum LED sa mení s rastúcou teplotou P-N prechodu.
- Hypotéza č. 3: Spektrometer vo Varroc Lighting Systems je vhodne nakalibrovaný pre meranie farebných súradníc LED.
- Hypotéza č. 4: S rastúcou teplotou P-N prechodu LED rastie elektrický prúd pretekajúci LED.

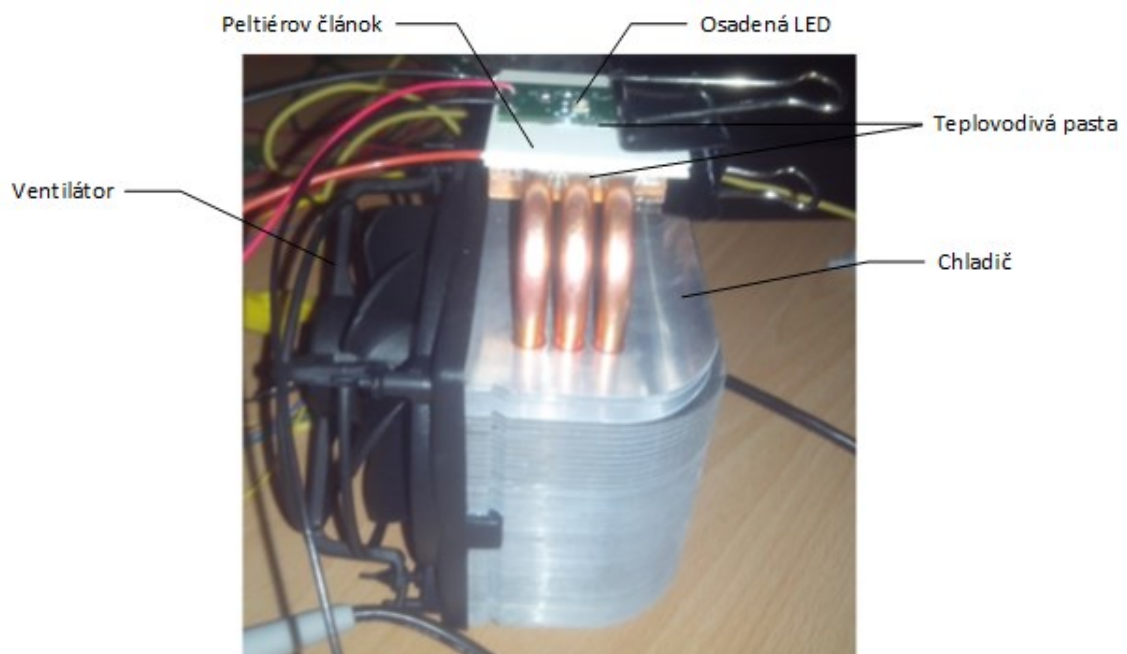
Tieto stanovené hypotézy korešpondujú so zadaním diplomovej práce, v niektorých bodoch toto zadanie rozširujú. Pri experimentoch potrebných na overenie hypotéz bolo použitých niekoľko prístrojov a elektronických súčiastok, viz. Tabuľka 7.2. Keďže P-N prechod je umiestnený vo vnútornej štruktúre LED, pre meranie jeho teploty by bolo potrebné do nej zasiahnuť. Preto bola pri experimentoch meraná teplota  $T_p$  na povrchu LED. Inou možnosťou je meranie teploty dosky, na ktorú je LED osadená a matematický výpočet teploty prechodu. Meracie zariadenie sa umiestňuje na dosku do blízkosti čipu LED. Takéto zariadenie však nebolo dostupné, môžeme však povedať, že s meniacou sa teplotou povrchu  $T_p$  sa mení aj teplota P-N prechodu  $T_j$ .

Pre kontrolu teploty Povrchu LED boli vybrané LED umiestnené na Peltierov článok osadený na chladiči s ventilátorom. Medzi LED a Peltierov článok bola nanosená teplovodivá pasta Arctic Cooling MX-4. Teplovodivá pasta bola nanosená rovnako medzi Peltierov článok a chladič.

Teplo z chladiča bolo odvádzané pomocou ventilátoru, ktorý bol na ňom umiestnený, viz. Obrázok. LED a Peltierov článok boli na chladiči zafixované pomocou svorky, ako ilustrujú Obrázok 7.1 a Obrázok 7.2:



Obrázok 7.1: Schéma kontrolovania teploty P-N prechodu LED



Obrázok 7.2: Snímka zostavy pre regulovanie teploty P-N prechodu LED

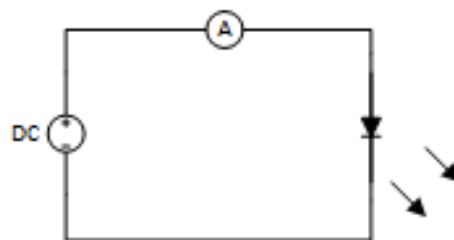
### 7.3 Hypotéza č. 1

**Hypotéza:** Hodnoty farebných súradníc sa menia pri rastúcej teplote P-N prechodu

**Experiment:** Pre overenie hypotézy boli zadane LED merané pri rôznych teplotách povrchu LED pri zachovaní nominálneho elektrického prúdu  $I_f$  udávaného výrobcom v katalógovom liste.

**Postup experimentu:**

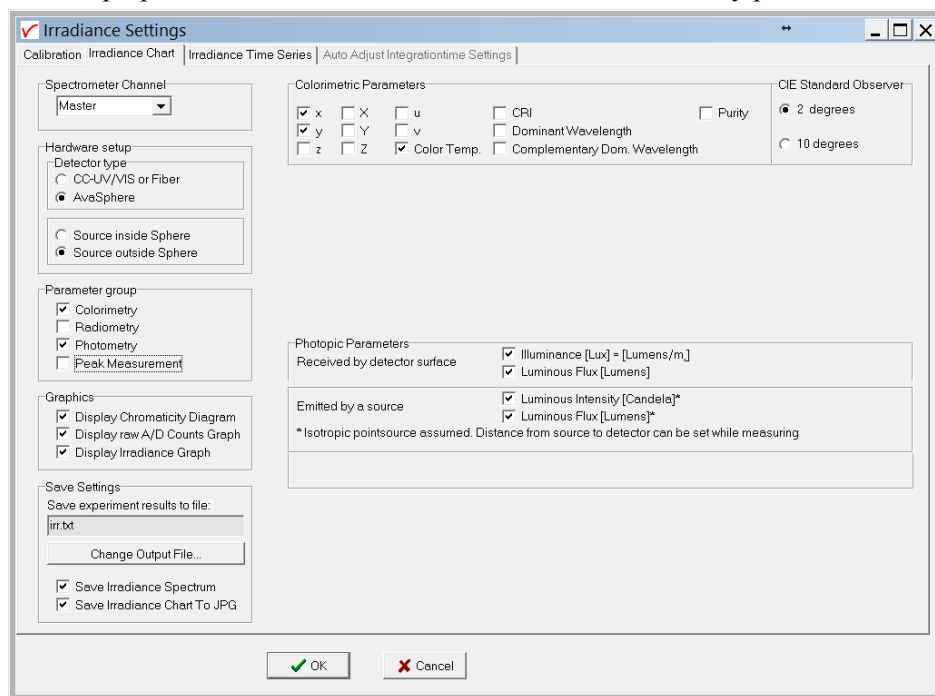
1. Zostavenie zapojenia podľa Obrázku 7.1.
2. Pripojenie Peltierovho článku na zdroj BK PRECISION. Nastavenie prúdového obmedzenia na 10 A, nastavenie napäťového obmedzenia na 15,8 V.
3. Pripojenie ventilátora na zdroj DIAMETRAL. Nastavenie prúdového obmedzenia na 160 mA.
4. Pripojenie LED na zdroj DIAMETRAL. V závislosti na meranej LED, nastavenie prúdového obmedzenia približne na dvojnásobok nominálneho prúdu udávaného výrobcom v katalógovom liste.
5. Zostavenie schémy zapojenia LED, ako je zobrazené na Obrázku 7.3.



Obrázok 7.3: Schéma zapojenia LED

6. Zapnutie zdroja pre LED, pomocou zmeny elektrického napätia postupne zvyšovať elektrický prúd pretekajúci LED.
7. Nastaviť elektrický prúd odčítaním hodnôt z multimetra tak, aby sa pohybovala v okolí nominálneho prúdu stanoveného výrobcom.
8. Zapnutie zdroja pre ventilátor, zapnutie Peltierovho článku.
9. Meranie teploty P-N prechodu pomocou termokamery, regulácia teploty pomocou zmeny elektrického prúdu Peltierovho článku, regulácia elektrického prúdu LED, až kým teplota na povrchu LED a nominálny prúd nedosiahnu hodnoty definované výrobcom v katalógovom liste.
10. Spustenie softwaru spektrometra.
11. Pripojenie sondy (optického vlákna) do integračnej gule.

12. Spustenie merania vyžarovacej charakteristiky pomocou softwaru Avantes: **Application – Absolute Irradiance Measurement**, načítanie kalibračného súboru, prepnutie na kartu **Irradiance Chart**, nastavenie karty podľa Obrázku:



Obrázok 7.4: Nastavenie spektrometra pre meranie vyžarovacej charakteristiky

13. Zakrytie vstupu integračnej gule, kliknutie na tlačidlo **Dark Reference**.
14. Priloženie teplotne a prúdovo stabilizovanej LED k vstupu integračnej gule.
15. Nastavenie automatickej hodnoty integračného času pomocou tlačidla **Autoconfigure Integrationtime**.
16. Nastavenie hodnoty **Average** na 30.
17. Odčítanie hodnôt súradníc x a y.
18. Zaznamenávanie hodnôt farebných súradníc LED 30-krát.
19. Zmena teploty P-N prechodu na dostatočne rozdielnu teplotu pomocou regulácie elektrického prúdu Peltierovho článku, pod dosiahnutí tejto teploty regulácia elektrického prúdu LED na hodnotu uvádzanú v katalógovom liste ako nominálny prúd.
20. Opakovanie bodov 13 – 18 pre ďalšiu LED.

Pre rôzne LED sa môžu hraničné teploty značne líšiť. Pri zvyšovaní teploty P-N prechodu LED je vhodné kontrolovať aj elektrický prúd tečúci cez LED, aby nedošlo k jej poškodeniu. Pri nastavovaní vysokej hraničnej teploty je vhodné riadiť sa odporúčaniami výrobcu v katalógovom liste. V prípade, že nie je možné zohriať povrch LED na požadovanú teplotu, je možné obrátiť polaritu Peltierovho článku, čím dosiahneme zohrievanie tej strany Peltierovho článku, ktorá je pripevnená k LED. Tým nastane zohrievanie dosky, na ktorú je

LED osadená. Pri tomto kroku je potrebná veľká opatrnosť a zohrievanie Peltierovho článku vykonávať veľmi pomaly.

### 7.3.1 Výsledky experimentu

Všetky namerané hodnoty farebných súradníc boli zaznamenávané do programu Microsoft Office Excel 2010. V tomto programe boli takisto pomocou grafov vytvorené oblasti binov, ktoré pre konkrétnu LED definuje výrobca v katalógovom liste. Namerané farebné súradnice boli zaznamenané do týchto grafov, čo ponúklo okamžitý prehľad o tom, či daná LED svieti podľa definície výrobcu.

Pri meraní LED Osram OSTAR LE UW D1W4 01 nebolo vykonané meranie pri teplote prechodu definovanej v katalógovom liste výrobcu z dvoch dôvodov: výrobca poskytuje informácie o zmene farebných súradníc v závislosti na teplote prechodu a druhým dôvodom je, že LED už bola osadená na chladiči, ktorý neumožňoval jeho upevnenie na Peltierov článok.

Výsledky pre jednotlivé LED boli porovnané pre nominálnu teplotu a teplotu po zahriatí. Rozdiely boli spracované pomocou štatistických metód. Podrobné výsledky meraní sú umiestnené v Prílohe B a Prílohe C. Kompletné výsledky meraní prototypov Luxeon F CW ES a Luxeon F CW Premium sú obsiahnuté v Neverejnej časti tejto Diplomovej práce.

Po meraniach boli spracované nasledujúce štatistické údaje:

- priemer ( $\mu$ ) – aritmetický priemer, vyjadruje typickú hodnotu popisujúcu súbor mnohých hodnôt,
- medián ( $\tilde{x}$ ) – hodnota, ktorá rozdeľuje súbor podľa veľkosti zoradených výsledkov na dve polovice s rovnakým počtom prvkov. Pre medián platí, že najmenej 50% hodnôt je menších alebo rovných a najmenej 50% hodnôt je väčších alebo rovných mediánu,
- modus ( $\hat{x}$ ) – hodnota, ktorá sa v súbore vyskytuje najčastejšie
- 75% kvartil, 25% kvartil ( $Q_{0,75}$   $Q_{0,25}$ ) – miera polohy rozdelenia pravdepodobnosti náhodnej veličiny. Popisujú body, v ktorých distribučná funkcia náhodnej premennej prechádza danou hodnotou,
- minimum, maximum – najmenšia a najväčšia hodnota, ktorá sa vo výbere nachádza,
- rozptyl ( $\sigma^2$ ) – stredná kvadratická odchýlka jednotlivých nameraných hodnôt od priemeru výberu.

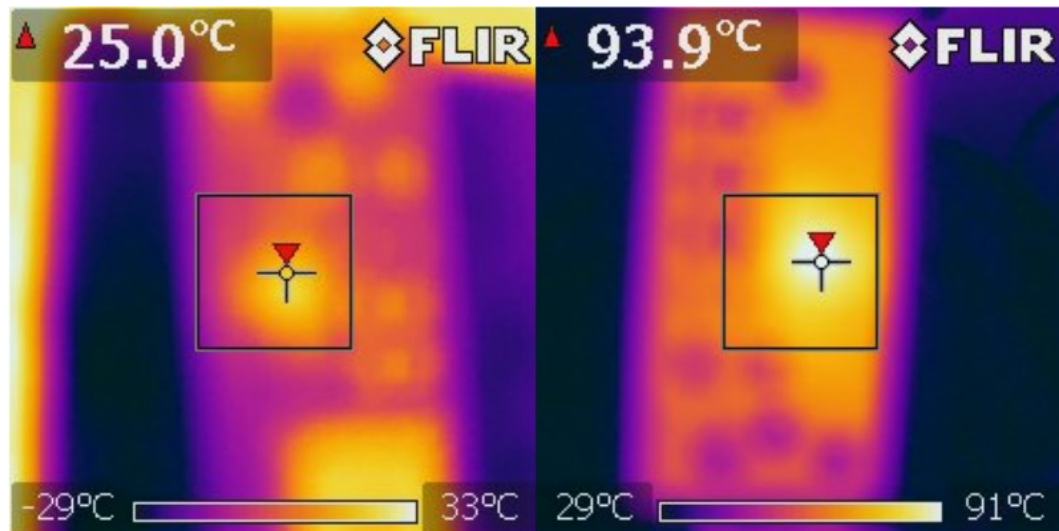
Všetky namerané hodnoty farebných súradníc boli následne vložené do programu Statgraphics Centurion XV, kde boli otestované na zhodu priemerov. Hypotézy boli testované na 95% intervale spoľahlivosti. Hypotézy boli testované zvlášť pre súradnice x a zvlášť pre súradnice y.

#### *Seoul Z5*

Výrobca definuje nominálne napätie 350 mA a farebné súradnice definuje pri teplote okolitého prostredia 25 °C a s odchýlkou súradníc binov  $\pm 0,01$ . Pri laboratórnych meraniach sa však ukázalo, že teplota prostredia ovplyvňuje farebné súradnice len minimálne, preto som

pristúpil k meraniu teploty na povrchu LED. Ako dolná hranica teploty bola zvolená hranica 25 °C, hornú hranicu tvorila teplota 100 °C. Odchýlka teploty pri všetkých meraniach LED všetkých výrobcov je  $\pm 2$  °C.

Rozloženie tepla na doske, na ktorej bola LED osadená a jej tepelné spektrum ilustruje Obrázok 7.5:



Obrázok 7.5: Rozloženie tepla dosky z osadenou LED Seoul Z5

Na Obrázku 7.5 je možné vidieť umiestnenie LED na doske a takisto miesta na doske, ktoré slúžia na odvod tepla z LED. Na obrázku vpravo majú vyššiu teplotu ako ich okolie z dôvodu odvádzania tepla, na obrázku z vyššou teplotou už predstavujú chladnejšie miesta a to z toho dôvodu, že nestíhajú odvádzať dostatok tepla, preto sa ich okolie zohrieva výraznejšie.

Fotografiu osadenej LED Seoul Z5 môžeme vidieť na Obrázku 7.6:



Obrázok 7.6: Osadená LED Seoul Z5

Jednotlivé dosky, na ktorých boli osadené LED boli vždy označené podľa binu, do ktorého LED spadali. Ako je vidieť na Obrázku 7.6, všetky LED mali nulové predradné odpory, preto neboli potrebné žiaden výpočty pre stanovenie elektrického prúdu pretekajúceho LED. Všetky merané LED boli osadené v spoločnosti Varroc Lighting Systems.

Štatisticky spracované výsledky meraní binu U2C3H sú uvedené v Tabuľke 7.3:

Tabuľka 7.3: Výsledky meraní LED Seoul Z5 U2C3H

Teplota povrchu	$T_p = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_p = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
Priemer	0,3643	0,3755	0,3659	0,3827	0,0016	0,0072
Medián	0,364	0,375	0,366	0,383	0,002	0,007
Módus	0,364	0,375	0,366	0,383	0,002	0,007
75% kvartil	0,365	0,376	0,36675	0,383	0,002	0,008
25% kvartil	0,364	0,375	0,365	0,382	0,001	0,00625
Minimum	0,364	0,375	0,363	0,381	-0,002	0,005
Maximum	0,365	0,377	0,368	0,386	0,004	0,011
Rozptyl	0,0004661	0,0005724	0,001094	0,0013429	0,0012484	0,0016692

Testovanie súradníc x:

$$H_0: \mu(x)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} = \mu(x)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}, H_A: \mu(x)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} \neq \mu(x)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

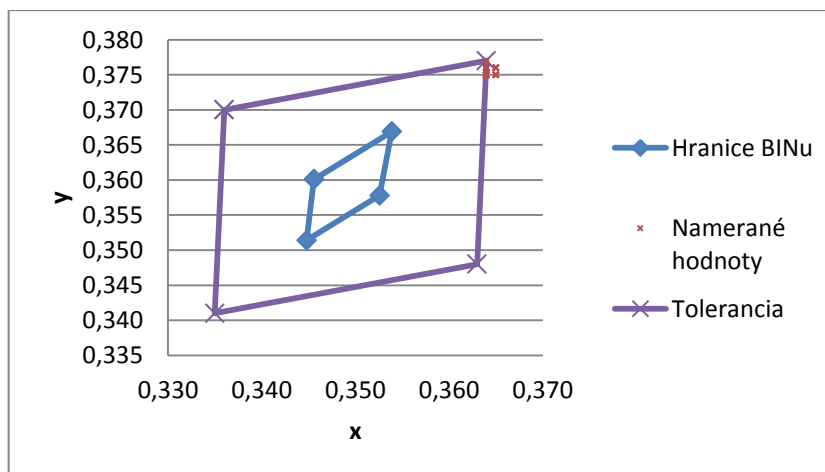
P-hodnota =  $6,99 \cdot 10^{-10} \ll 0,05 \rightarrow$  zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Testovanie súradníc y:

$$H_0: \mu(y)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} = \mu(y)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}, H_A: \mu(y)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} \neq \mu(y)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

P-hodnota =  $0 \ll 0,05 \rightarrow$  zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Z testu hypotéz vyplýva, že zmena teploty má vplyv na farebné súradnice x aj y pre LED Seoul Z5 U2C3H. Porovnanie nameraných výsledkov pri  $T_p = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  s údajmi deklarovanými výrobcom je možné vidieť na Obrázku 7.7:



Obrázok 7.7: Porovnanie nameraných farebných súradníc Z5 U2C3H s údajmi výrobcu

Štatisticky spracované výsledky meraní binu U2E7I sú uvedené v Tabuľke 7.4:

Tabuľka 7.4: Výsledky meraní LED Seoul Z5 U2E7I

Teplota povrchu	$T_p = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_p = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
<b>Priemer</b>	0,3915	0,3689	0,4052	0,389	0,0137	0,0192
<b>Medián</b>	0,391	0,37	0,405	0,389	0,014	0,019
<b>Módus</b>	0,391	0,37	0,406	0,389	0,014	0,018
<b>75% kvartil</b>	0,392	0,37075	0,406	0,39	0,014	0,02075
<b>25% kvartil</b>	0,391	0,369	0,40425	0,38725	0,013	0,018
<b>Minimum</b>	0,388	0,368	0,402	0,385	0,009	0,015
<b>Maximum</b>	0,393	0,371	0,408	0,392	0,017	0,024
<b>Rozptyl</b>	0,0010417	0,0009248	0,0012847	0,0018473	0,0016174	0,0021669

Testovanie súradníc x:

$$H_0: \mu(x)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} = \mu(x)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}, H_A: \mu(x)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} \neq \mu(x)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

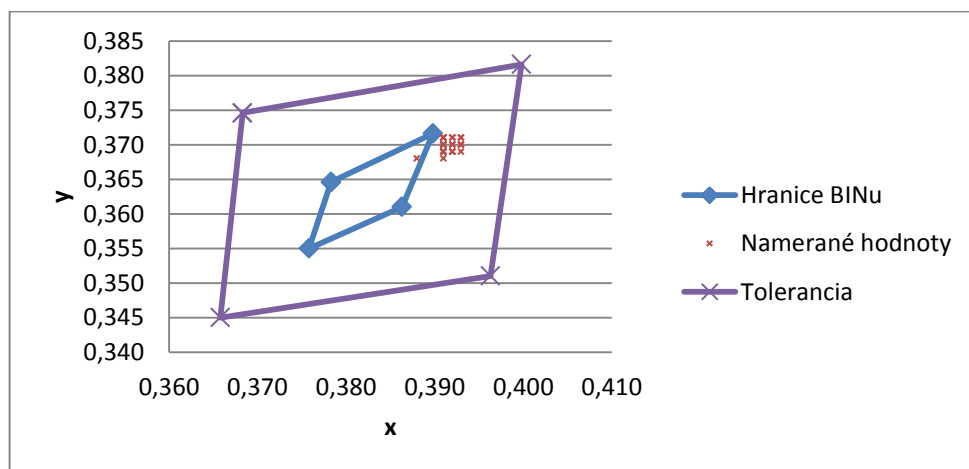
P-hodnota = 0 << 0,05 → zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Testovanie súradníc y:

$$H_0: \mu(y)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} = \mu(y)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}, H_A: \mu(y)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} \neq \mu(y)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

P-hodnota = 0 << 0,05 → zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Z testu hypotéz vyplýva, že zmena teploty má vplyv na farebné súradnice x aj y pre LED Seoul Z5 U2E7I. Porovnanie nameraných výsledkov pri  $T_p = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  s údajmi deklarovanými výrobcom je možné vidieť na Obrázku 7.8:



Obrázok 7.8: Porovnanie nameraných farebných súradníc Z5 U2E7I s údajmi výrobcu



Štatisticky spracované výsledky meraní binu U3C8I sú uvedené v Tabuľke 7.5:

Tabuľka 7.5: Výsledky meraní LED Seoul Z5 U3C8I

Teplota povrchu	$T_p = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_p = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
Priemer	0,3517	0,376	0,355	0,3839	0,0033	0,0079
Medián	0,352	0,376	0,354	0,385	0,003	0,009
Módus	0,352	0,376	0,354	0,385	0,002	0,009
75% kvartil	0,352	0,376	0,357	0,385	0,005	0,009
25% kvartil	0,351	0,375	0,353	0,384	0,00125	0,008
Minimum	0,35	0,373	0,352	0,358	-0,002	-0,018
Maximum	0,355	0,379	0,36	0,388	0,009	0,012
Rozptyl	0,0011492	0,0013391	0,0023413	0,005047	0,0028032	0,0050265

Testovanie súradníc x:

$$H_0: \mu(x)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} = \mu(x)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}, H_A: \mu(x)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} \neq \mu(x)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

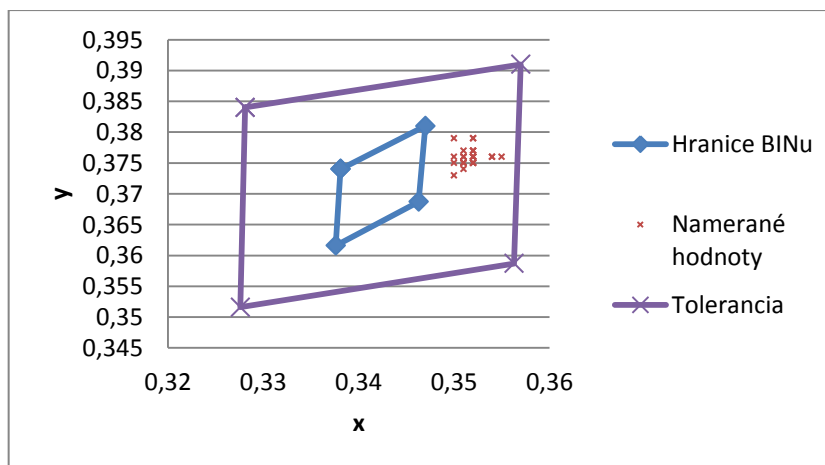
P-hodnota =  $5,03093 \cdot 10^{-9} \ll 0,05 \rightarrow$  zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Testovanie súradníc y:

$$H_0: \mu(y)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} = \mu(y)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}, H_A: \mu(y)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} \neq \mu(y)_{T_p=100\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

P-hodnota =  $2,02931 \cdot 10^{-11} \ll 0,05 \rightarrow$  zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Z testu hypotéz vyplýva, že zmena teploty má vplyv na farebné súradnice x aj y pre LED Seoul Z5 U3C8I. Porovnanie nameraných výsledkov pri  $T_p = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  s údajmi deklarovanými výrobcom je možné vidieť na Obrázku 7.9:



Obrázok 7.9: Porovnanie nameraných farebných súradníc Z5 U3C8I s údajmi výrobcu

Štatisticky spracované výsledky meraní binu U1D5H sú uvedené v Tabuľke 7.6:

Tabuľka 7.6: Výsledky meraní LED Seoul Z5 U1D5H

Teplota povrchu	$T_p = 25\text{ °C}$		$T_p = 100\text{ °C}$		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
Priemer	0,3754	0,3671	0,3837	0,375	0,0083	0,0079
Medián	0,375	0,367	0,385	0,376	0,0095	0,009
Módus	0,375	0,368	0,385	0,376	0,01	0,009
75% kvartil	0,376	0,368	0,385	0,377	0,01	0,01
25% kvartil	0,375	0,366	0,384	0,375	0,009	0,008
Minimum	0,375	0,366	0,355	0,36	-0,02	-0,006
Maximum	0,376	0,368	0,386	0,378	0,011	0,012
Rozptyl	0,0005040	0,0008996	0,0055207	0,0041021	0,0054719	0,0040406

Testovanie súradníc x:

$$H_0: \mu(x)_{T_p=25\text{ °C}} = \mu(x)_{T_p=100\text{ °C}}, H_A: \mu(x)_{T_p=25\text{ °C}} \neq \mu(x)_{T_p=100\text{ °C}}$$

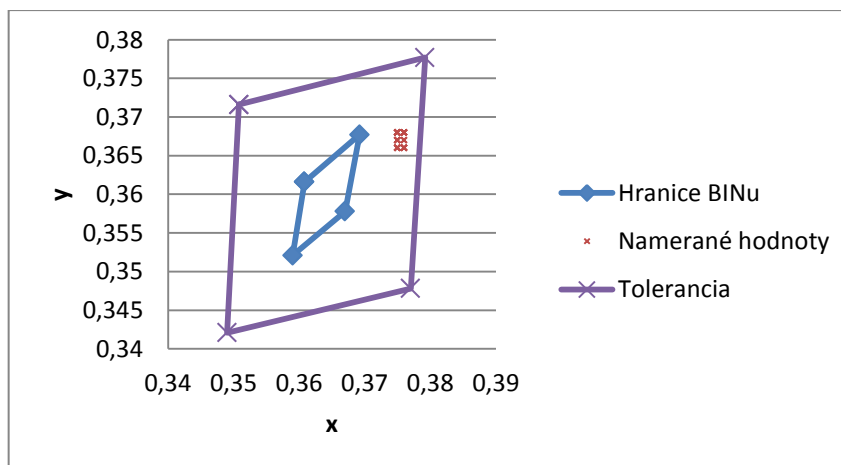
P-hodnota =  $2,82712 \cdot 10^{-11} \ll 0,05 \rightarrow$  zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Testovanie súradníc y:

$$H_0: \mu(y)_{T_p=25\text{ °C}} = \mu(y)_{T_p=100\text{ °C}}, H_A: \mu(y)_{T_p=25\text{ °C}} \neq \mu(y)_{T_p=100\text{ °C}}$$

P-hodnota =  $0 \ll 0,05 \rightarrow$  zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Z testu hypotéz vyplýva, že zmena teploty má vplyv na farebné súradnice x aj y pre LED Seoul Z5 U1D5H. Porovnanie nameraných výsledkov pri  $T_p = 25\text{ °C}$  s údajmi deklarovanými výrobcom je možné vidieť na Obrázku 7.10:

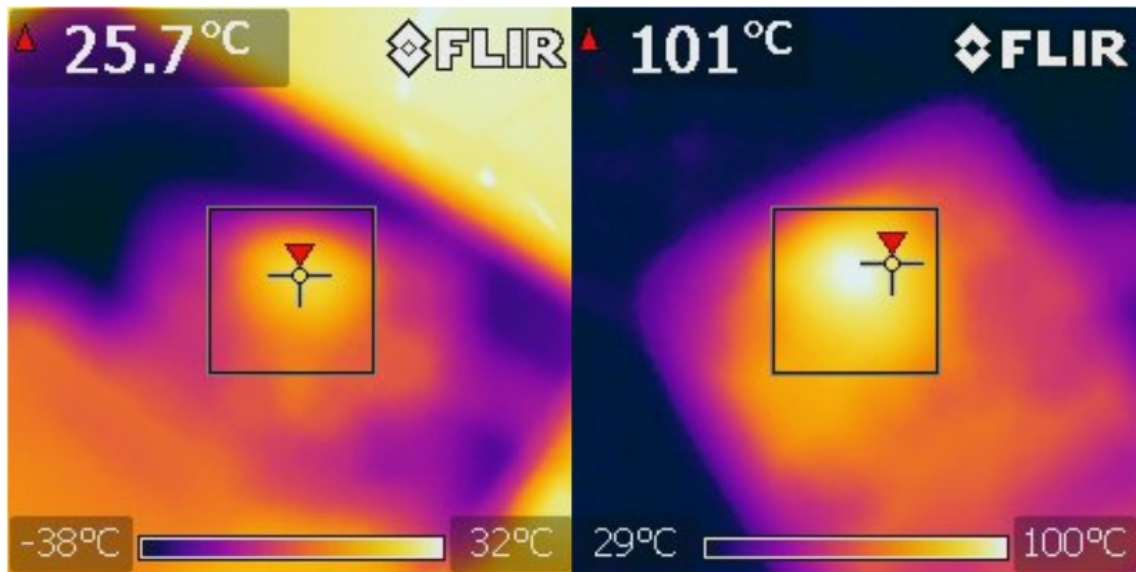


Obrázok 7.10: Porovnanie nameraných farebných súradníc Z5 U1D5H s údajmi výrobcu

### ***Seoul P8***

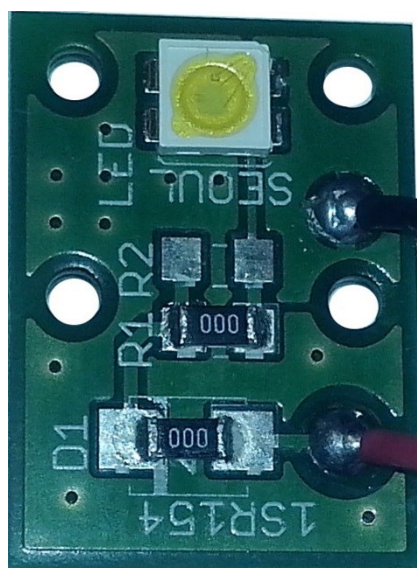
Pri meraní LED Seoul P8 bol zvolený rovnaký postup ako pri meraní LED Seoul Z5. Keďže sa jednalo o LED, ktorá bola dodaná ako predvážací kus, nebola zaradená do žiadneho binu. Ako dolná hranica teploty bola zvolená hranica 25 °C, hornú hranicu tvorila teplota 100 °C. Odchýlka teploty je opäť  $\pm 2$  °C. Nominálne napätie LED je 350 mA.

Rozloženie tepla na doske, na ktorej bola LED osadená a jej tepelné spektrum ilustruje Obrázok 7.11:



*Obrázok 7.11: Rozloženie tepla dosky z osadenou LED Seoul P8*

Doska, na ktorej je osadená táto LED má o niečo horšie vlastnosti pre odvod tepla, preto diery pre odvod prebytočného tepla z LED nie sú na obrázkoch z termokamery jasne viditeľné. Fotografia LED Seoul P8 osadenej na doske je znázornená na Obrázku 7.12:



*Obrázok 7.12: Osadená LED Seoul P8*

Štatisticky spracované výsledky meraní LED Seoul P8 sú uvedené v Tabuľke 7.7:

Tabuľka 7.7: Výsledky meraní LED Seoul P8

Teplota povrchu	$T_p = 25\text{ °C}$		$T_p = 100\text{ °C}$		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
<b>Priemer</b>	0,3381	0,3537	0,3445	0,3606	0,0064	0,0069
<b>Medián</b>	0,338	0,354	0,345	0,361	0,006	0,007
<b>Módus</b>	0,338	0,354	0,345	0,361	0,006	0,007
<b>75% kvartil</b>	0,339	0,354	0,345	0,361	0,007	0,008
<b>25% kvartil</b>	0,338	0,353	0,344	0,36	0,006	0,00625
<b>Minimum</b>	0,337	0,352	0,343	0,358	0,005	0,003
<b>Maximum</b>	0,339	0,357	0,346	0,362	0,008	0,01
<b>Rozptyl</b>	0,0006815	0,0012848	0,0006789	0,0008137	0,0009714	0,0015698

Testovanie súradníc x:

$$H_0: \mu(x)_{T_p=25\text{ °C}} = \mu(x)_{T_p=100\text{ °C}}, H_A: \mu(x)_{T_p=25\text{ °C}} \neq \mu(x)_{T_p=100\text{ °C}}$$

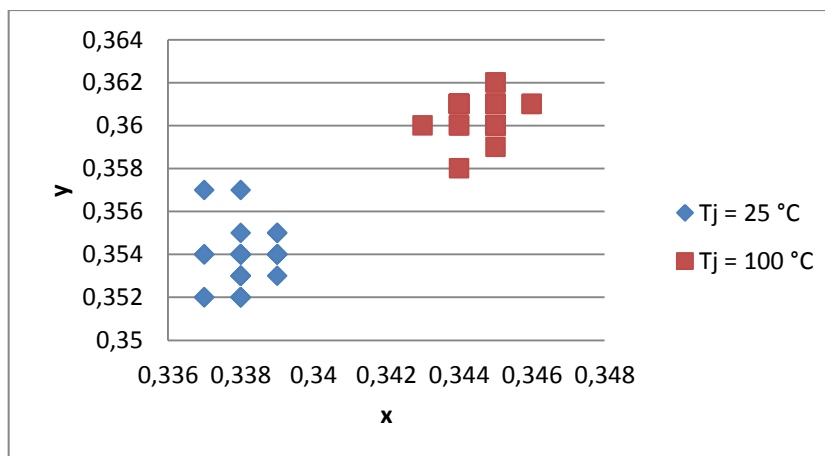
P-hodnota = 0 << 0,05 → zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Testovanie súradníc y:

$$H_0: \mu(y)_{T_p=25\text{ °C}} = \mu(y)_{T_p=100\text{ °C}}, H_A: \mu(y)_{T_p=25\text{ °C}} \neq \mu(y)_{T_p=100\text{ °C}}$$

P-hodnota = 0 << 0,05 → zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Z testu hypotéz vyplýva, že zmena teploty má vplyv na farebné súradnice x aj y pre LED Seoul P8. Grafické porovnanie nameraných výsledkov pri rôznych teplotách ponúka Obrázok 7.13:



Obrázok 7.13: Rozdiel v farebných súradniciach LED Seoul P8 pri zmene teploty  $T_p$

**Philips Luxeon Rebel LXML PWN1 0100 NTPD**

Výrobca Philips uvádza iné kritérium pre určenie teploty, pri ktorej sú merané farebné súradnice a iné charakteristiky jeho LED. Neudáva teplotu prechodu  $T_j$ , ale teplotu  $T_{pad}$  medzi LED a doskou, na ktorej je osadená. [22]

Prepočet  $T_j$  na  $T_{pad}$  je možný podľa nasledujúceho vzťahu (7.1):

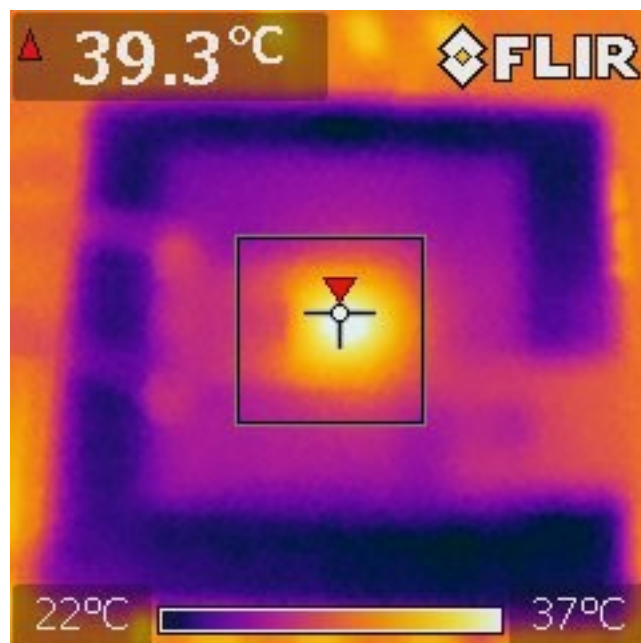
$$T_{pad} = T_j - [(R\theta_{J-thermalpad} + R\theta_{thermalpad-s}) * I * U] \quad (7.1),$$

kde  $T_{pad}$  predstavuje teplotu medzi LED a doskou,  $T_j$  je teplota prechodu,  $R\theta_{J-thermalpad}$  je tepelný odpor medzi P-N prechodom a materiálom LED,  $R\theta_{thermalpad-s}$  je tepelný odpor materiálu spájajúceho LED a dosku,  $I$  je elektrický prúd pretekajúci LED a  $U$  je elektrické napätie LED.

Podľa katalógového listu je súčet tepelných odporov pre túto LED 16 °C/W, nominálny prúd 350 mA a nominálne napätie 3,15 V. Po dosadení do vzťahu (7.1) dostaneme:

$$T_{pad} = T_j - 17,64$$

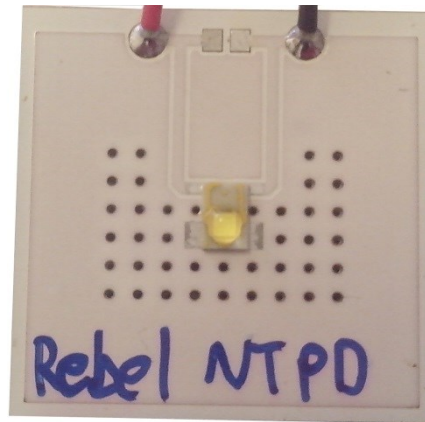
Doska, na ktorú bola LED osadená má vynikajúce vlastnosti pre odvod tepla, o čom svedčia aj snímka z termokamery na Obrázku 7.14:



Obrázok 7.14: Rozloženie tepla dosky osadenou LED Luxeon Rebel

Na obrázku môžeme pozorovať rovnomerné rozloženie teploty po celej doske, na ktorej je LED osadená. Tým pádom je chladenie tejto LED oveľa efektívnejšie v porovnaní s predchádzajúcimi meranými LED. Výrobca v katalógovom liste uvádza nepresnosť pri definícií binov 0,005 pre obe súradnice.

Doska je osadená systémom dier, ktoré umožňujú veľmi dobrý odvod tepla, ako je možné vidieť aj na Obrázku 7.15:



Obrázok 7.15: Osadená LED Luxeon Rebel NTPD

Štatisticky spracované výsledky meraní LED Luxeon Rebel NTPD sú uvedené v Tabuľke 7.8:

Tabuľka 7.8: Výsledky meraní LED Luxeon Rebel NTPD

Teplota povrchu	$T_p = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_p = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
<b>Priemer</b>	0,3767	0,3697	0,3822	0,3814	0,0055	0,0117
<b>Medián</b>	0,376	0,3695	0,382	0,382	0,0055	0,0125
<b>Módus</b>	0,376	0,369	0,382	0,382	0,005	0,013
<b>75% kvartil</b>	0,377	0,37	0,383	0,383	0,006	0,013
<b>25% kvartil</b>	0,376	0,369	0,382	0,38125	0,005	0,011
<b>Minimum</b>	0,376	0,369	0,379	0,363	0,003	-0,007
<b>Maximum</b>	0,379	0,372	0,387	0,387	0,009	0,017
<b>Rozptyl</b>	0,0009154	0,0008684	0,0012972	0,003748	0,0013582	0,0039034

Testovanie súradníc x:

$$H_0: \mu(x)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} = \mu(x)_{T_p=55\text{ }^{\circ}\text{C}}, H_A: \mu(x)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} \neq \mu(x)_{T_p=55\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

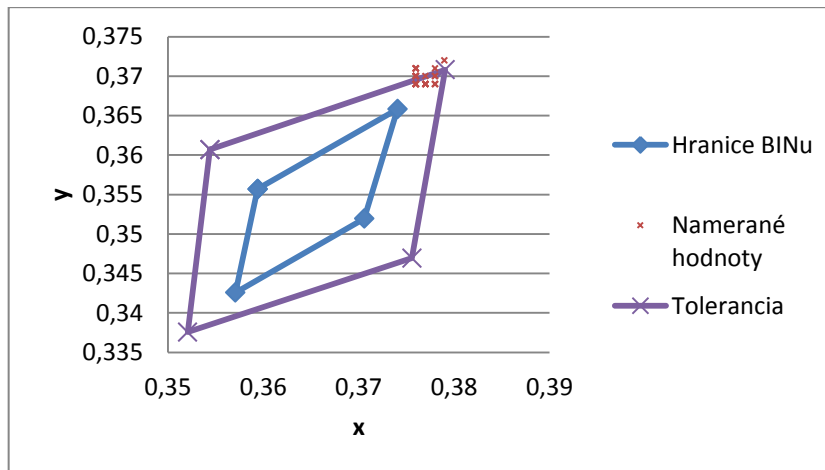
P-hodnota = 0 << 0,05 → zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Testovanie súradníc y:

$$H_0: \mu(y)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} = \mu(y)_{T_p=55\text{ }^{\circ}\text{C}}, H_A: \mu(y)_{T_p=25\text{ }^{\circ}\text{C}} \neq \mu(y)_{T_p=55\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

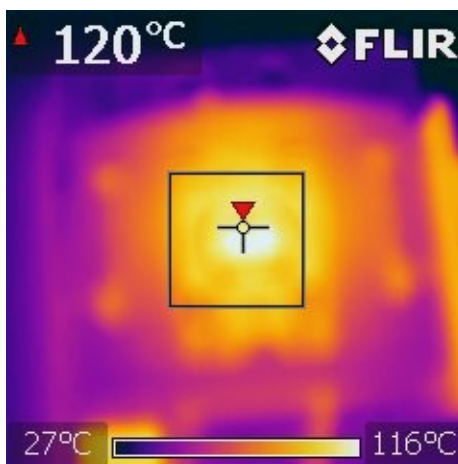
P-hodnota = 0 << 0,05 → zamietame  $H_0$  pre interval spoľahlivosti 95%.

Z testu hypotéz vyplýva, že zmena teploty má vplyv na farebné súradnice  $x$  aj  $y$  pre Luxeon Rebel NTPD. Porovnanie nameraných výsledkov pri  $T_p = 25^\circ\text{C}$  s údajmi deklarovanými výrobcom je možné vidieť na Obrázku 7.10:



Obrázok 7.16: Porovnanie nameraných farebných súradníc Rebel NTPD s údajmi výrobcu **OSRAM LE UW D1W4 01 JM**

Táto LED je zložená zo 4 čipov, ktoré sú osadené dohromady. Ponúka veľký svetelný výkon (až 630 lm), a vďaka svojim relatívne malým rozmerom aj široké pole nasadenia. Jej nominálne napätie je však až 14,1 V pri nominálnom prúde 700 mA. LED bola dodaná osadená na hliníkovom chladiči ktorý zabezpečoval jej chladenie. To zabráňovalo jej upevneniu na Peltierov článok resp. chladič, na ktorom bol Peltierov článok osadený. Aj napriek osadeniu LED na chladič, s ktorým bola dodaná, teplota povrchu dosiahla  $120^\circ\text{C}$ , viz. Obrázok 7.17:



Obrázok 7.17: Teplota povrchu LED **OSRAM LE UW D1W4 01 JM**

Výrobca tejto LED, spoločnosť OSRAM, uvádza v katalógovom liste údaje o posune farebných súradníc v závislosti na teplote P-N prechodu. Pre teplotu  $120^\circ\text{C}$  a elektrický prúd 700 mA je definovaný farebný posun pre súradnicu  $x$  o 0,012 a pre súradnicu  $y$  o 0,014. [6] Táto charakteristika je v katalógovom liste definovaná pre LED s jedným čipom, avšak môžeme predpokladať, že zmena nebude príliš výrazná. LED sa vďaka chladiču teplotne stabilizuje pri nominálnom prúde na  $T_p = 120^\circ\text{C}$ , a ani po niekoľkých minútach svietenia sa teplota



prechodu nemení. Preto sú merania farebných súradníc tejto LED vykonávané pri  $T_p = 120\text{ °C}$ . Výrobca udáva presnosť súradníc definujúcich farebné biny s odchýlkou 0,005.

Fotografia tejto výkonnej LED je zobrazená na Obrázku 7.18:



Obrázok 7.18: LED Osram LE UW D1W4 osadená na hliníkovom chladiči

Výsledky merania farebných súradníc tejto LED sú v Tabuľke 7.9:

Tabuľka 7.9: Výsledky meraní LED Osram LE UW D1W4 01 JM

Teplota povrchu	$T_p = 120\text{ °C}$	
Súradnice	x	y
<b>Priemer</b>	0,3526	0,3717
<b>Medián</b>	0,352	0,371
<b>Módus</b>	0,352	0,37
<b>75% kvartil</b>	0,35375	0,37375
<b>25% kvartil</b>	0,352	0,37
<b>Minimum</b>	0,349	0,369
<b>Maximum</b>	0,357	0,377
<b>Rozptyl</b>	0,0017927	0,0021485

Pre overenie, či táto LED patrí do binu, ktorým je označená, som pozmenil súradnice binu o hodnoty posunu farebných súradníc v závislosti na teplote prechodu definované v katalógovom liste LED, t.j. 0,012 pre súradnice x a 0,014 pre súradnice y.

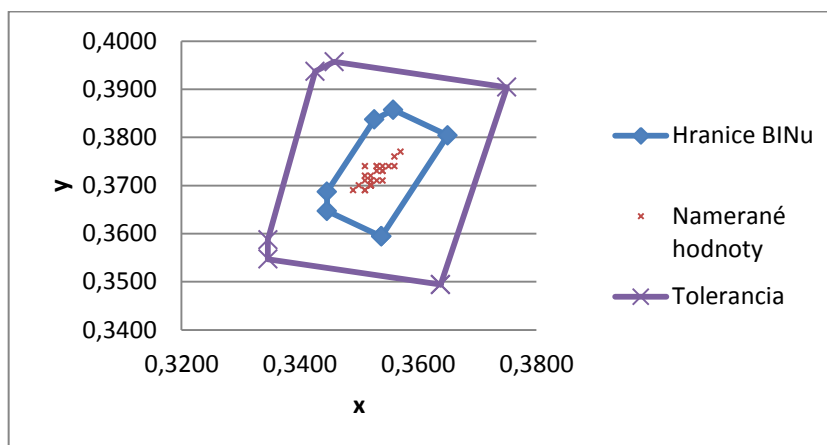


Zmenu definície farebného binu zobrazuje Tabuľka 7.10:

Tabuľka 7.10: Zmena definície farebného binu JM v závislosti na  $T_p$

Súradnice	x	y	Súradnice	x	y
$T_p = 25\text{ °C}$	0,3418	0,3454	$T_p = 120\text{ °C}$	0,3538	0,3594
	0,3326	0,3507		0,3446	0,3647
	0,3326	0,3547		0,3446	0,3687
	0,3406	0,3697		0,3526	0,3837
	0,3438	0,3717		0,3558	0,3857
	0,353	0,3664		0,3650	0,3804

Porovnanie nameraných výsledkov pri  $T_p = 100\text{ °C}$  s údajmi deklarovanými výrobcom, ktoré boli posunuté kvôli závislosti farebných súradníc na teplote prechodu, je možné vidieť na Obrázku 7.19:



Obrázok 7.19: Porovnanie nameraných farebných súradníc LED Osram LE UW DIW4 s údajmi výrobcu.

### 7.3.2 Záver experimentu

Pri experimente sme dokázali, že farebné súradnice svetla vyžarovaného LED s skutočne ovplyvnené teplotou P-N prechodu. Priemerná hodnota posunu farebných súradníc je pre súradnice  $x = 0,011$  a pre súradnice  $y = 0,018$ . Do tohto priemeru boli započítané aj priemerne rozdiely LED Luxeon F CW ES a Luxeon F CW Premium, ktorých namerané hodnoty sú spracované v Neverejnej časti tejto Diplomovej práce.

Na základe testov hypotéz, ktoré vo všetkých prípadoch vyvrátili hypotézu o rovnosti priemerov nameraných farebných súradníc pri rôznych teplotách môžeme tvrdiť, že pôvodnú stanovenú hypotézu pripúšťame, a teda so zmenou teploty P-N prechodu skutočne dochádza k zmene farebných súradníc.

## 7.4 Hypotéza č. 2

**Hypotéza:** Svetelné spektrum LED sa mení s rastúcou teplotou P-N prechodu

**Experiment:** Meranie spektra vyžarovaného LED pri rôznych teplotách P-N prechodu

**Postup experimentu:** Pri experimente bol použitá rovnaká sústava na chladenie LED a rovnaký spektrometer ako pri overovaní hypotézy č. 1, pričom bolo zaznamenávané spektrum LED. Postup pri experimente bol nasledujúci:

1. Zapojenie obvodu podľa Obrázku 7.3. Zapojenie chladiaceho systému podľa Obrázku 7.1.
2. Nastavenie teploty P-N prechodu a nominálneho prúdu podľa údajov výrobcu v katalógovom liste.
3. Zvýšenie teploty P-N prechodu o 25 °C pri zachovaní nominálneho prúdu.
4. Uloženie nameraného spektra.
5. Opakovanie bodov 3 a 4 až po hraničnú teplotu.

### 7.4.1 Výsledky experimentu

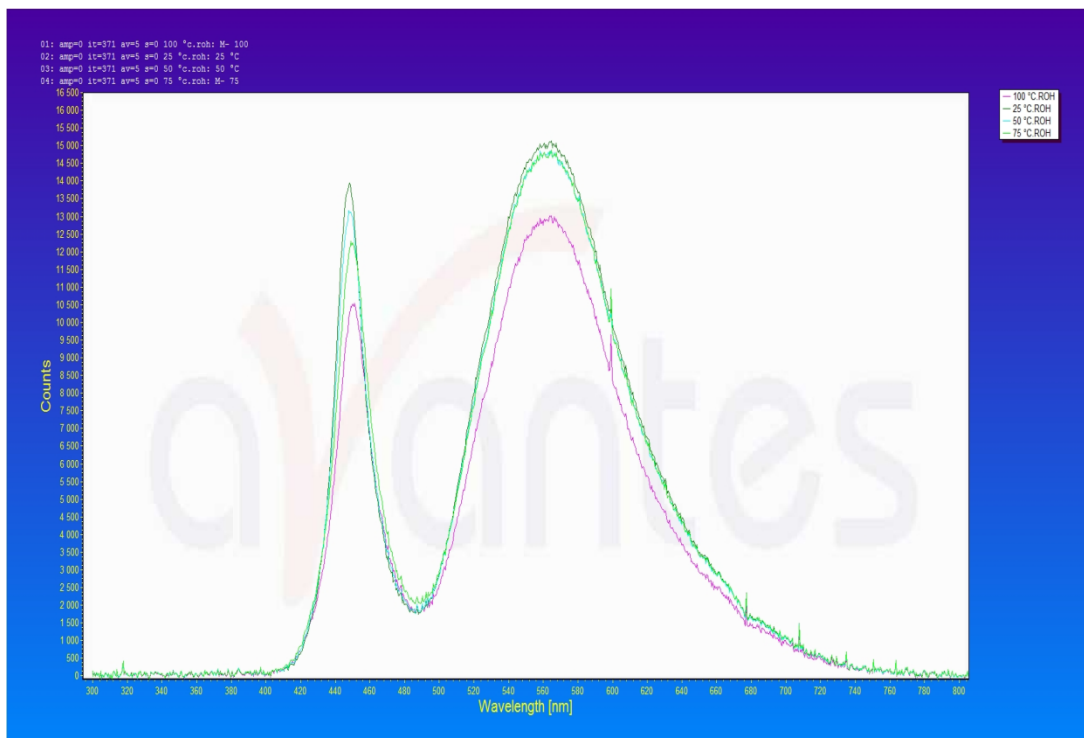
Pri tomto experimente bola vynechaná LED Osram LE UW D1W4 z dôvodu nemožnosti regulovaného chladenia. Pri LED Luxeon Rebel bola krátkodobou prekročená maximálna odporúčaná teplota P-N prechodu definovaná výrobcom. Žiadna zmena vlastností LED spôsobená krátkodobým prehriatím LED však nenastala. To bolo overené následným opakovaným meraním farebných súradníc. Zmerané údaje o LED Luxeon F CW ES a Luxeon F CW Premium sú uvedené v Tajnej časti tejto Diplomovej práce.

#### *LED od výrobcu Seoul*

LED diódy od výrobcu Seoul boli postupne zohrievané z teploty  $T_p = 25\text{ °C}$  až na teplotu  $T_p = 100\text{ °C}$  s krokom 25 °C pri zachovaní nominálneho prúdu 350 mA.

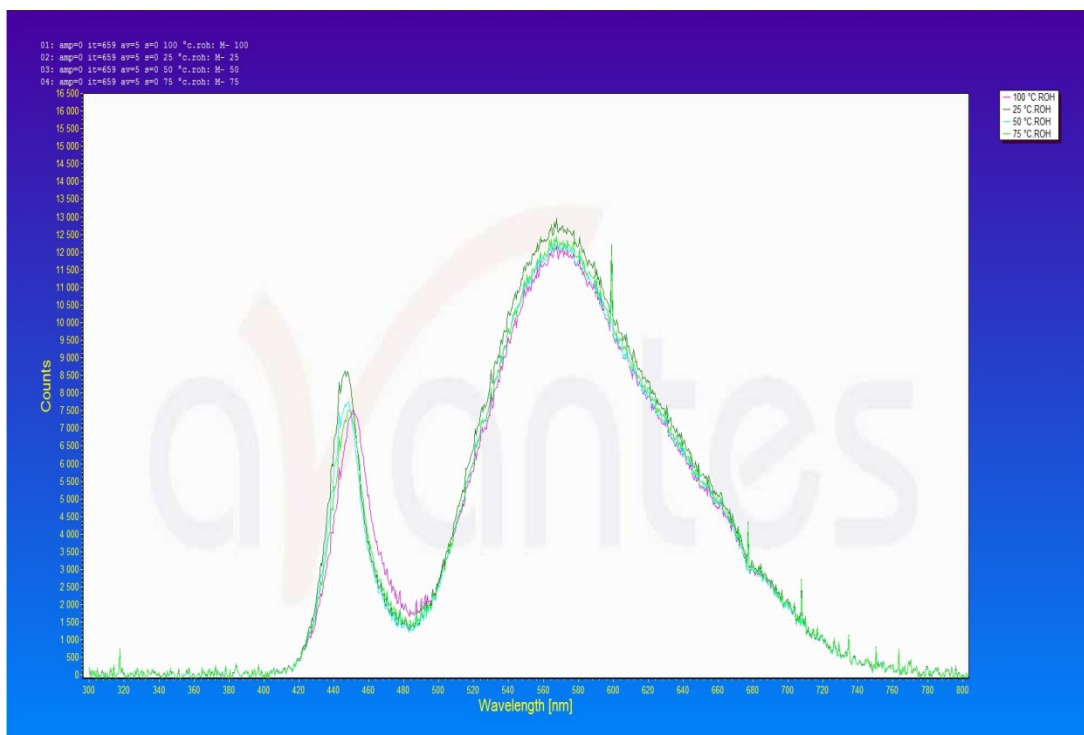
Na Obrázku 7.20 je možné pozorovať pokles svetelného výkonu modrej LED v oblasti 440 nm spôsobený zmenou teploty P-N prechodu, pričom je pozorovateľné aj posúvanie špičky smerom k vyšším vlnovým dĺžkam. V okolí 450 nm je možné pozorovať fosforovú konverziu modrého svetla na biele. Ako je zrejmé, luminofor začne meniť svoje vlastnosti až pri vyšších teplotách, nakoľko do teploty  $T_p = 75\text{ °C}$  je zmena intenzity jeho spektra takmer zanedbateľná, potom však nastáva výrazný pokles jeho intenzity. Zmena dominantnej vlnovej dĺžky však pri luminofoze nenastáva. Pre pripomenutie, pri všetkých teplotách povrchu LED zostal elektrický prúd konštantný.

Zmena spektra v závislosti na zmene teploty  $T_p$  LED Seoul Z5 U2C3H:



Obrázok 7.20: Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 U2C3H v závislosti na  $T_p$

Ďalšou meranou LED bola Seoul Z5 z binu U2E7I. Zmenu spektra binu U2E7I ilustruje Obrázok 7.21:

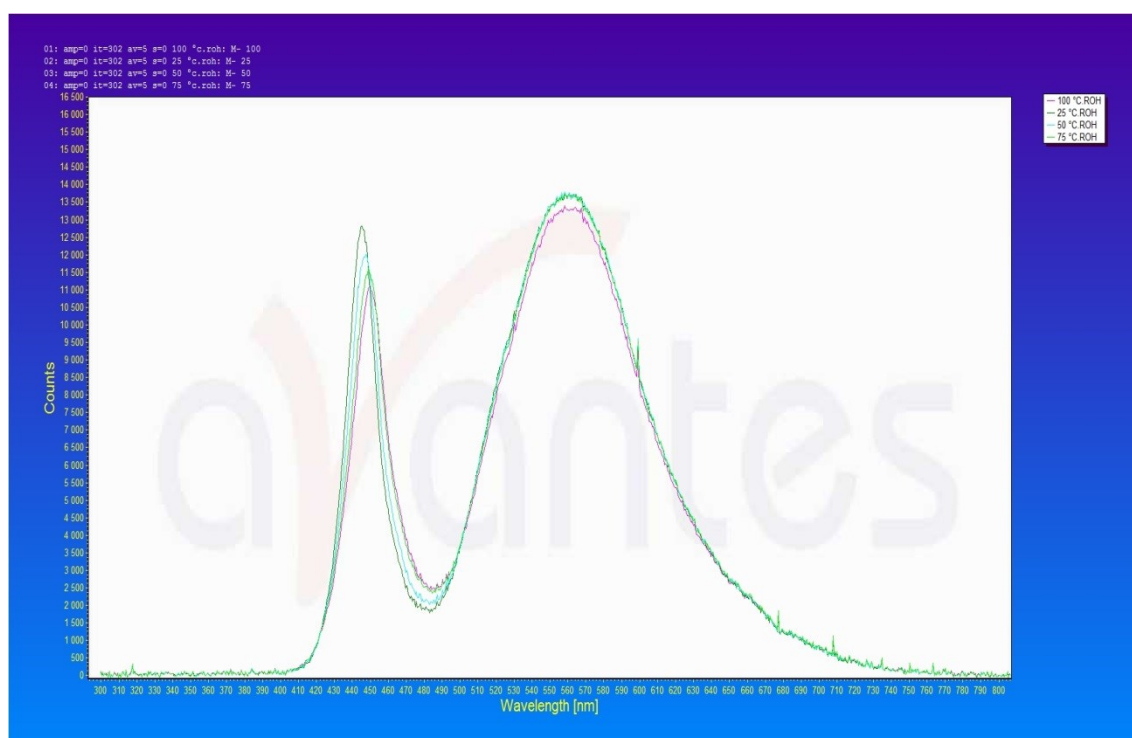


Obrázok 7.21: Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 U2C3H v závislosti na  $T_p$

Táto LED mala pravdepodobne poškodený P-N prechod, nakoľko jej spektrum pripomína skôr spektrum LED, ktorá vyžaruje teplé biele svetlo, a nie neutrálne. Napriek tomu LED splnila pri meraní farebných súradníc definíciu binu, do ktorého patrí, a to aj pri opakovanom meraní.

Napriek tomu, opäť môžeme pozorovať pokles v optickom výkone modrej zložky spektra a miernu zmenu vo vlnovej dĺžke modrej zložky, v tomto prípade však nedochádza k zmene optických vlastností luminoforu, a úroveň, ktorou ovplyvňuje modrú zložku spektra, sa nemení.

Nasledujúcou LED od výrobcu Seoul bola Z5 U3C8I. Zmerané spektrálne charakteristiky je možné vidieť na Obrázku 7.22:

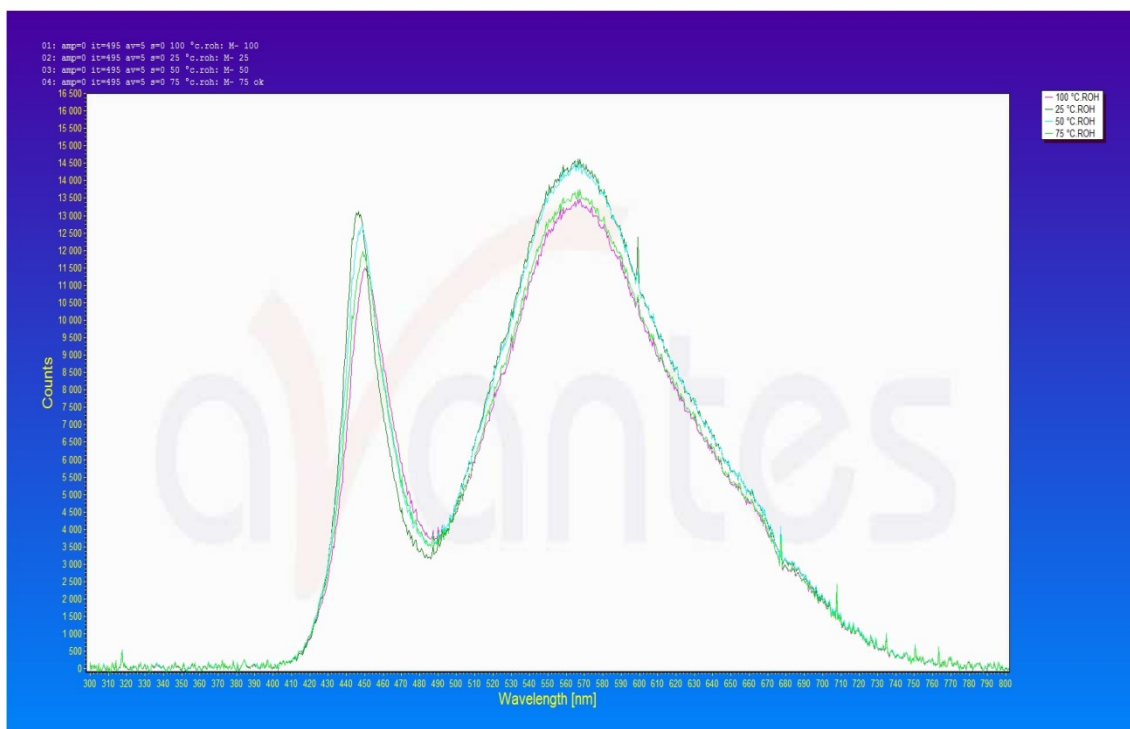


Obrázok 7.22: Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 U3C8I v závislosti na  $T_p$

Opäť je možné pozorovať pokles svetelného výkonu modrej LED s rastúcou teplotou prechodu a mierne zvýšenie vlnovej dĺžky špičky modrej zložky spektra. Luminofor v tomto prípade relatívne udržiava svoje farebné vlastnosti, aj keď pri zohriatí povrchu LED na 100 °C dôjde k malému poklesu jeho špičky. Pomer oboch zložiek spektra približne zodpovedá studenému svetlu, aj keď spektrum luminoforu by malo mať nižšiu intenzitu.

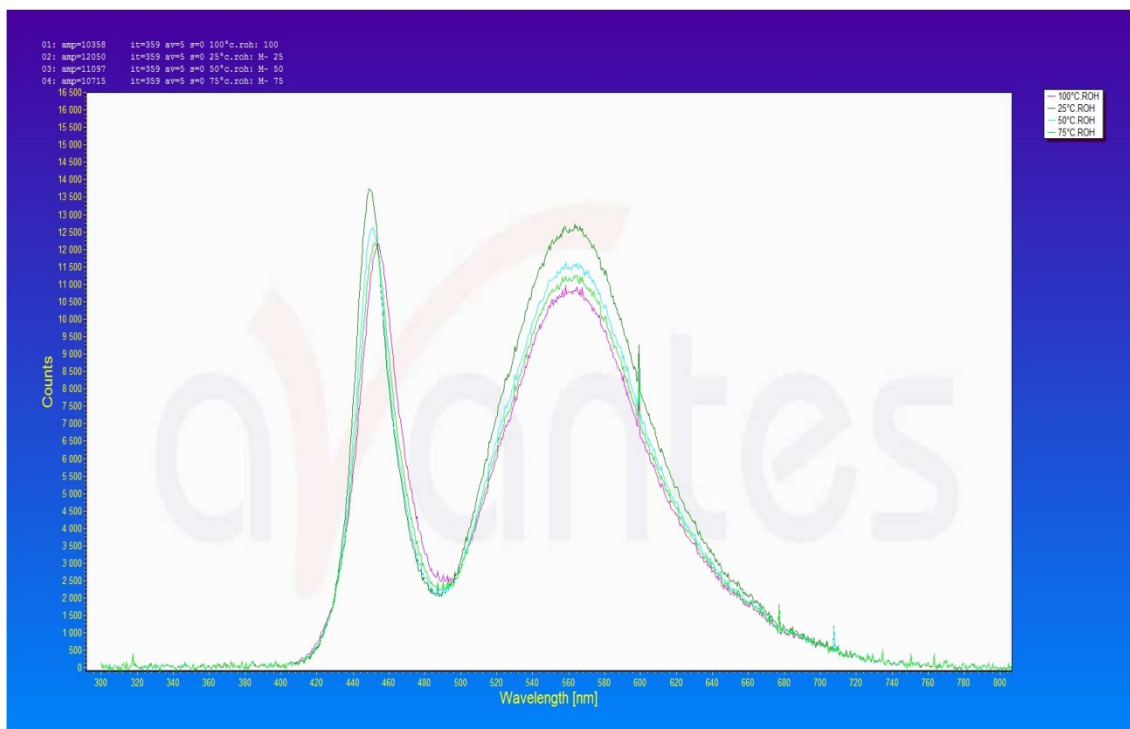
Poslednou LED z kategórie Z5 bola LED zaradená do binu U1D5H. Jedná sa o LED s neutrálnym bielym svetlom, preto má špička spektrálnej charakteristiky luminoforu o niečo vyššiu intenzitu ako špička intenzity modrej LED. V tomto prípade môžeme opakovane pozorovať pokles výkonu modrej LED ako pokles intenzity v okolí 440 nm. Pre tento farebný bin takisto platí, že vrstva luminoforu sa zahreje už pri  $T_p = 75$  °C, a prejaví sa ako pokles intenzity oranžovej časti spektra v okolí 560 nm.

Priebeh zmeny spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 U1D5H je možné pozorovať na Obrázku 7.23:



Obrázok 7.23: Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 U1D5H v závislosti na  $T_p$

Rovnakým spôsobom bola zmeraná aj LED Seoul P8. Jej spektrálnu charakteristiku pre rôzne teploty povrchu LED vidíme na Obrázku 7.24:

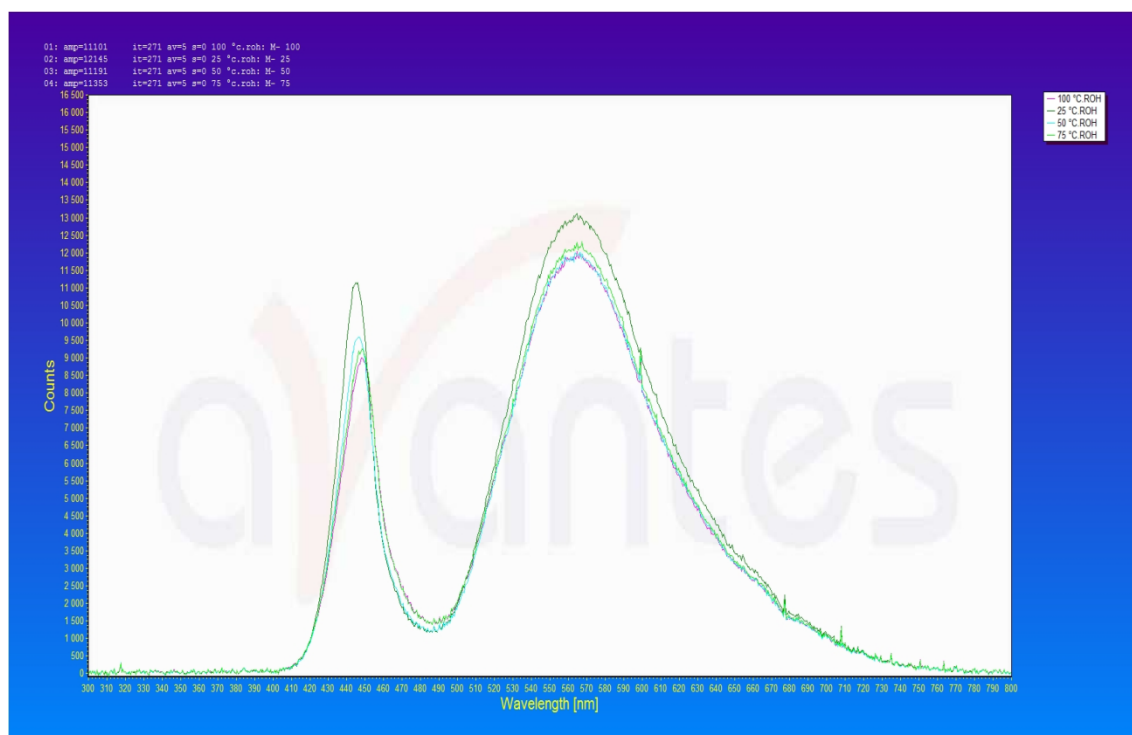


Obrázok 7.24: Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 P8 v závislosti na  $T_p$

V tomto prípade môžeme pozorovať, že sa jedná o LED vyžarujúcu studené biele svetlo. Vidíme výraznejší pokles intenzity modrej LED pri zmene teploty povrchu LED z 25 °C na 50 °C, ale pri zmene teploty zo 75 °C na 100 °C je tento pokles veľmi nevýrazný a prejavuje sa tu skôr posun špičky intenzity smerom k vyšším vlnovým dĺžkam. Pri porovnávaní spektra luminoforu vidíme rovnako veľký pokles intenzity pri zmene teplote z 25 na 50 °C, následné poklesy intenzity už nie sú tak výrazné. Mierne odlišné správanie spektrálnych charakteristík tejto LED oproti diódam typu Z5 môže vyplývať z odlišnej konštrukcie samotnej LED (viz. Obrázok 7.6 a Obrázok 7.12).

### ***Philips Luxeon Rebel LXML PWN1 0100***

Táto LED patrí do kategórie LED vyžarujúcich neutrálne biele svetlo. To potvrdzuje aj zmeraná spektrálna charakteristika zobrazená na Obrázku 7.25:



Obrázok 7.25: Zmena spektrálnej charakteristiky LED Luxeon Rebel v závislosti na  $T_p$

Ako už bolo spomenuté vyššie, pri meraní teplotnej závislosti spektrálnej charakteristiky bolo krátkodobo prekročená hranica teploty P-N prechodu, ktorú definuje výrobca. Napriek tomuto prekročeniu však LED nebola poškodená.

Pri analýze spektra vidíme výrazný pokles intenzity modrej diódy pri zohriatí povrchu LED z 25 °C na 50 °C. Nasledujúci pokles intenzity LED už nie je tak výrazný. Opäť pozorujeme mierny posun vo vlnovej dĺžke maxima modrej LED. Pokles intenzity spektra luminoforu je pri zmene teploty  $T_p$  z 25 °C na 50 °C opäť výraznejší, následne sa pre ostatné teploty takmer nemení.

#### 7.4.2 Záver experimentu

Vzhľadom na namerané spektrálne charakteristiky pri rôznych teplotách môžeme prijať hypotézu, že s meniacou sa teplotou sa mení aj spektrum LED. Zmena pomeru spektra modrej LED a spektra luminoforu sa následne odráža aj do zmeny farebných súradníc vyžarovaného svetla, čo sa potvrdilo už pri testovaní hypotézy č. 1. Zmerané spektrá pri  $T_p = 25\text{ °C}$  však nie úplne zodpovedajú definícií spektrálnych charakteristík, ktoré výrobcovia uvádzajú vo svojich katalógových listoch. To môže byť zapríčinené rozdielnou metodikou merania spektrálnych charakteristík, prípadne inou citlivosťou spektrometrov na jednotlivé pásma vlnových dĺžok a ich konfiguráciou.

### 7.5 Hypotéza č. 3

**Hypotéza:** : Spektrometer vo Varroc Lighting Systems je vhodne nakalibrovaný pre meranie farebných súradníc LED.

**Experiment:** Meranie farebných súradníc zadaných LED v laboratóriu Varroc Lighting Systems a aplikácia priemerného posunu farebných súradníc vyplývajúceho z merania mimo laboratória Varroc Lighting Systems.

**Postup experimentu:** Experiment prebiehal v temnej miestnosti v laboratóriu spoločnosti Varroc Lighting Systems. Pri meraní bola použitá termokamera FLIR i7, laboratórny zdroj Manson NSP-3630, spektrometer Avantes AvaSpec-2048 poskytnutý spoločnosťou Varroc Lighting Systems (sériové číslo 1010083U1) a multimeter Agilent U1251A, ktorý bol použitý aj pri predchádzajúcich experimentoch.

Postup merania bol nasledujúci:

1. Zapojenie obvodu podľa Obrázku 7.3.
2. Nastavenie a udržiavanie nominálneho prúdu LED, počkanie na teplotnú stabilizáciu LED, monitorovanie teploty povrchu LED.
3. Meranie farebných súradníc, každá LED je premeraná 30-krát.

#### 7.5.1 Výsledky experimentu

Teploty povrchu LED boli rovnaké ako v prípade experimentu hypotézy č. 1 pre hornú hranicu teploty. Podstata experimentu spočívala v overení nastavenia spektrometra, ktorý je v spoločnosti Varroc Lighting Systems pripojený k integračnej guli a slúži na merania vlastností LED. Zobrazené definície farebných binov kompenzujú posun farebných súradníc o priemerné hodnoty posunu vypočítané pri overovaní hypotézy č. 1 (0,012 pre súradnice x a 0,018 pre súradnice y). Podrobné výsledky meraní sú umiestnené v Prílohe C. Kompletné výsledky meraní prototypov Luxeon F CW ES a Luxeon F CW Premium sú obsiahnuté v Neverejnej časti tejto Diplomovej práce.

**LED výrobcu Seoul**

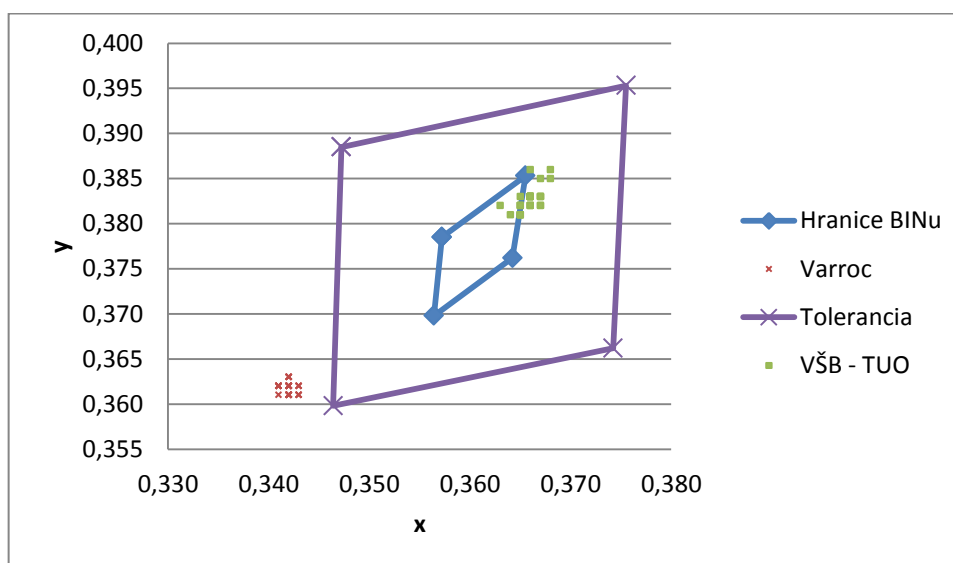
Teplota povrchu LED sa pohybovala okolo hranice 100 °C.

Tabuľka 7.11 zobrazuje štatisticky spracované hodnoty nameraných farebných súradníc LED Seoul Z5 U2C3H pri  $T_p = 100^\circ\text{C}$  a ich porovnanie s hodnotami farebných súradníc zmeraných v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava pri rovnakých podmienkach:

Tabuľka 7.11: Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul Z5 U2C3H

Meranie	Varroc		VŠB-TUO		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
<b>Priemer</b>	0,342	0,362	0,366	0,383	0,024	0,021
<b>Medián</b>	0,342	0,362	0,366	0,383	0,024	0,021
<b>Modus</b>	0,342	0,362	0,366	0,383	0,024	0,02
<b>75% kvartil</b>	0,342	0,362	0,3668	0,383	0,025	0,022
<b>25% kvartil</b>	0,342	0,361	0,365	0,382	0,023	0,02
<b>Minimum</b>	0,341	0,361	0,363	0,381	0,022	0,018
<b>Maximum</b>	0,343	0,363	0,368	0,386	0,026	0,024
<b>Rozptyl</b>	0,00067	0,0007	0,0011	0,001	0,00128	0,001

Grafické porovnanie nameraných hodnôt v laboratóriu Varroc Lighting Systems, v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava a hodnôt definovaných výrobcou je možné vidieť na Obrázku 7.26



Obrázok 7.26: Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Z5 U2C3H



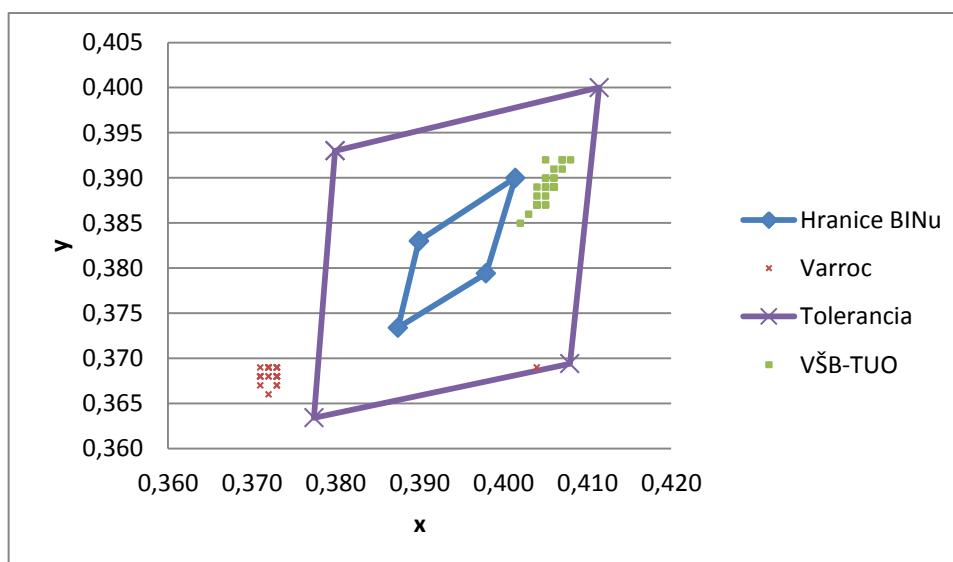
Vidíme, že hodnoty farebných súradníc, ktoré boli zmerané v laboratóriu spoločnosti Varroc Lighting Systems nie sú zhodné s ani s údajmi definovanými výrobcom, ani s výsledkami meraní v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava.

Podobná situácia nastáva pri meraní farebných súradníc LED Seoul Z5 U2E7I. Štatistické údaje sú zobrazené v Tabuľke 7.12:

Tabuľka 7.12: Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul Z5 U2E7I

Meranie	Varroc		VŠB-TUO		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
<b>Priemer</b>	0,373	0,368	0,4053	0,389	0,033	0,021
<b>Medián</b>	0,372	0,368	0,405	0,389	0,033	0,021
<b>Modus</b>	0,373	0,368	0,406	0,389	0,033	0,021
<b>75% kvartil</b>	0,373	0,369	0,406	0,39	0,034	0,022
<b>25% kvartil</b>	0,372	0,368	0,40425	0,38725	0,032	0,02
<b>Minimum</b>	0,371	0,366	0,402	0,385	0,029	0,017
<b>Maximum</b>	0,404	0,369	0,408	0,392	0,036	0,024
<b>Rozptyl</b>	0,000785	0,000785	0,001285	0,001847	0,001597	0,001685

Grafické porovnanie nameraných hodnôt v laboratóriách a údajmi z katalógového listu sú znázornené na Obrázku 7.27:



Obrázok 7.27: Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Z5 U2E7I

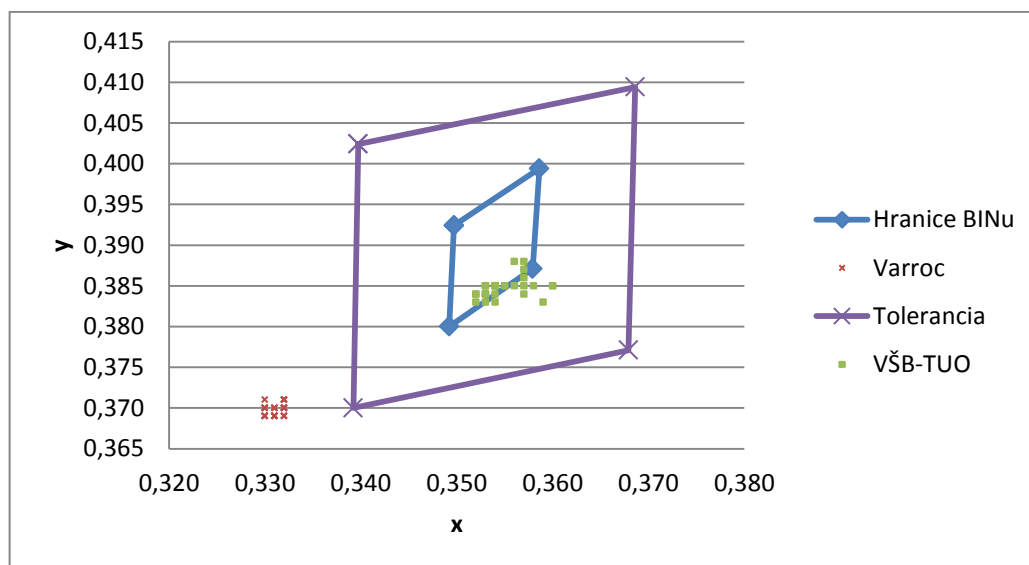
Opäť teda môžeme pozorovať, že výsledky meraní v laboratóriu Varroc Lighting Systems nezodpovedajú definícií farebných súradníc podľa katalógového listu výrobcu a takisto sa líšia od hodnôt nameraných v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava.

Ďalšou meranou LED bola Seoul Z5 U3C8I. Štatistický spracované výsledky meraní je možné vidieť v Tabuľke 7.13:

Tabuľka 7.13: Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul Z5 U3C8I

Meranie	Varroc		VŠB-TUO		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
Priemer	0,3318	0,3698	0,355	0,385	0,02317	0,015
Medián	0,331	0,37	0,354	0,385	0,023	0,015
Modus	0,332	0,37	0,354	0,385	0,023	0,015
75% kvartil	0,332	0,37	0,357	0,385	0,025	0,016
25% kvartil	0,33	0,369	0,353	0,384	0,022	0,014
Minimum	0,33	0,369	0,352	0,383	0,02	0,012
Maximum	0,352	0,371	0,36	0,388	0,028	0,019
Rozptyl	0,00391	0,0007	0,0023	0,001	0,00491	0,002

Vidíme, že aj v tomto prípade dochádza k rozdielom v hodnotách zmeraných farebných súradníc. Grafické znázornenie týchto rozdielov spolu s definíciou farebného binu podľa výrobcu poskytuje Obrázok 7.28:



Obrázok 7.28: Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Z5 U3C8I

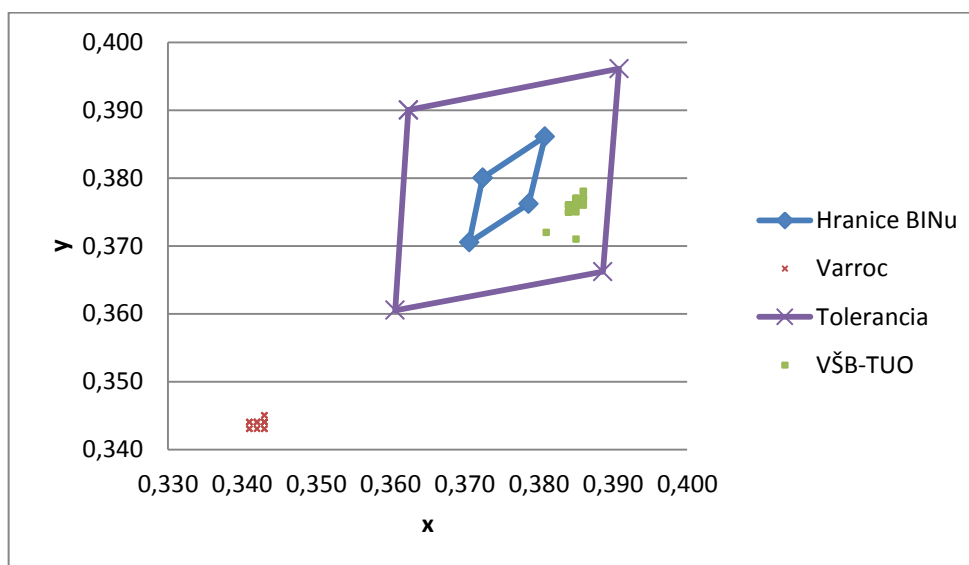
Hodnoty namerané v laboratóriu Varroc Lighting Systems sú teda opäť odlišné od hodnôt udaných výrobcom a zároveň sú rozdielne v porovnaní s hodnotami farebných súradníc zmeranými v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava.

Poslednou LED zo série Z5 bola led zaradená do binu U1D5H. Štatistické výsledky meraní je možné nájsť v Tabuľke 7.14:

Tabuľka 7.14: Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul Z5 U1D5H

Meranie	Varroc		VŠB-TUO		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
<b>Priemer</b>	0,342233	0,343833	0,383733	0,375	0,0415	0,031167
<b>Medián</b>	0,342	0,344	0,385	0,376	0,0425	0,032
<b>Modus</b>	0,343	0,344	0,385	0,376	0,043	0,032
<b>75% kvartil</b>	0,343	0,344	0,385	0,377	0,043	0,033
<b>25% kvartil</b>	0,342	0,34325	0,384	0,375	0,042	0,03125
<b>Minimum</b>	0,341	0,343	0,355	0,36	0,014	0,016
<b>Maximum</b>	0,343	0,345	0,386	0,378	0,045	0,035
<b>Rozptyl</b>	0,000817	0,000592	0,005521	0,004102	0,005374	0,004061

Grafické znázornenie hodnôt farebných súradníc, ktoré boli namerané v laboratóriách Varroc Lighting Systems a Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava, spolu s hodnotami definovanými výrobcom vyobrazuje Obrázok 7.29:



Obrázok 7.29: Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Z5 U1D5H

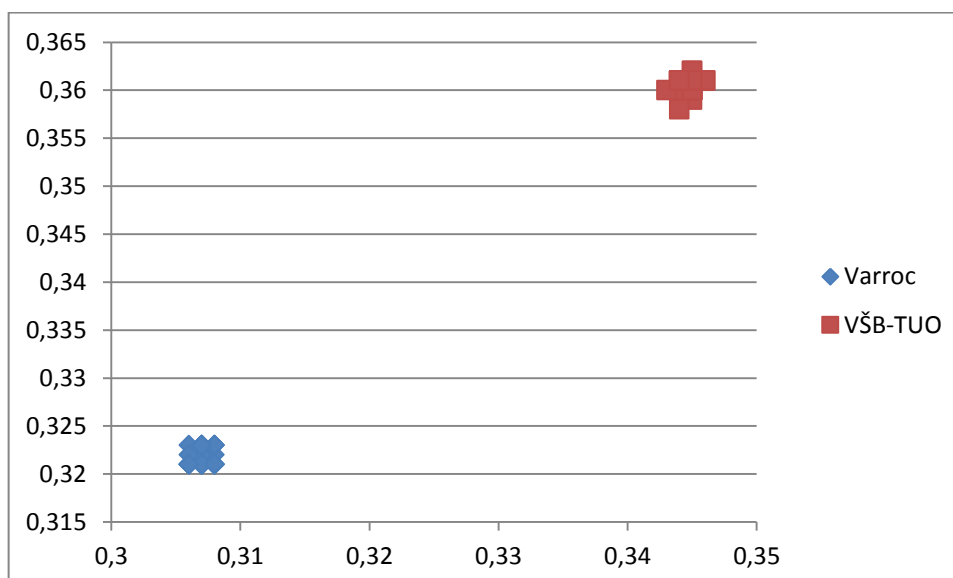
Opäť môžeme pozorovať značný rozdiel medzi hodnotami súradníc nameranými vo Varroc Lighting Systems a v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava. Hodnoty farebných súradníc namerané v laboratóriu Varroc Lighting Systems sa takisto nezhodujú ani s údajmi uvedenými v katalógovom liste LED.

Poslednou LED od výrobcu Seoul, pri ktorej boli merané farebné súradnice vyžarovaného svetla bola LED Seoul P8. Rozdiel v hodnotách farebných súradníc nameraných v laboratóriu Varroc Lighting Systems a v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava znázorňuje Tabuľka 7.15:

Tabuľka 7.15: Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul P8

Meranie	Varroc		VŠB-TUO		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
<b>Priemer</b>	0,3071	0,3217	0,3446	0,3606	0,0375	0,0389
<b>Medián</b>	0,307	0,321	0,345	0,361	0,038	0,039
<b>Modus</b>	0,307	0,321	0,345	0,361	0,038	0,04
<b>75% kvartil</b>	0,30775	0,323	0,345	0,361	0,038	0,04
<b>25% kvartil</b>	0,307	0,321	0,344	0,36	0,037	0,038
<b>Minimum</b>	0,306	0,321	0,343	0,358	0,036	0,035
<b>Maximum</b>	0,308	0,323	0,346	0,362	0,039	0,04
<b>Rozptyl</b>	0,000691	0,000907	0,000679	0,000814	0,000861	0,001137

Keďže LED Seoul P8 nebola zaradená do farebného binu, Obrázok 7.29 poskytuje len grafické porovnanie hodnôt, ktoré boli namerané v spoločnosti Varroc Lighting Systems a v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava.



Obrázok 7.30: Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc LED Seoul P8

Z obrázku môžeme pozorovať, že rozdiel medzi nameranými hodnotami farebných súradníc je opäť značný. Je veľmi pravdepodobné, že pokiaľ by bola LED zaradená

do farebného binu, tak by namerané hodnoty farebných súradníc z jedného laboratória nesplňovali údaje výrobcu ucedené v katalógovom liste.

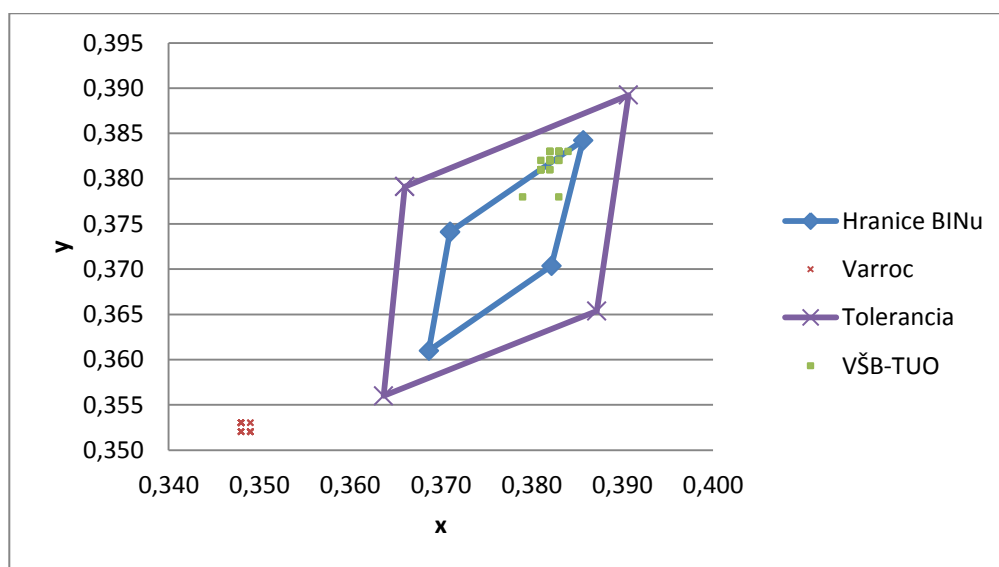
**Philips Luxeon Rebel LXML PWN1 0100 NTPD**

Teplota prechodu v prípade tejto LED bola nastavená rovnako ako v experimente pri overovaní hypotézy č. 1. Pohľad na štatisticky spracované výsledky prináša Tabuľka 7.16:

Tabuľka 7.16: Porovnanie nameraných hodnôt LED Rebel LXML PWN1 0100 NTPD

Meranie	Varroc		VŠB-TUO		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
Priemer	0,3484	0,3525	0,3822	0,381	0,0338	0,0285
Medián	0,348	0,3525	0,382	0,382	0,034	0,03
Modus	0,348	0,353	0,382	0,382	0,034	0,029
75% kvartil	0,349	0,353	0,383	0,383	0,034	0,03
25% kvartil	0,348	0,352	0,382	0,381	0,033	0,029
Minimum	0,348	0,352	0,379	0,363	0,031	0,011
Maximum	0,349	0,353	0,387	0,387	0,039	0,034
Rozptyl	0,00049	0,0005	0,0013	0,004	0,00134	0,004

Keďže táto LED bola zaradená do farebného binu, môžeme graficky porovnať výsledky namerané v oboch laboratóriách spolu s medzami farebného binu udávaného výrobcom. Toto porovnanie poskytuje Obrázok 7.31:



Obrázok 7.31: Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Rebel NTPD

Z obrázku je zrejmé, že hodnoty farebných súradníc, ktoré boli namerané v laboratóriu Varroc Lighting Systems sú značne odlišné od údajov nameraných v laboratóriu Vysokej školy

báňskej – Technickej univerzity Ostrava. Rovnako tieto namerané hodnoty nespádajú do definície farebného binu, ktorú udáva výrobca.

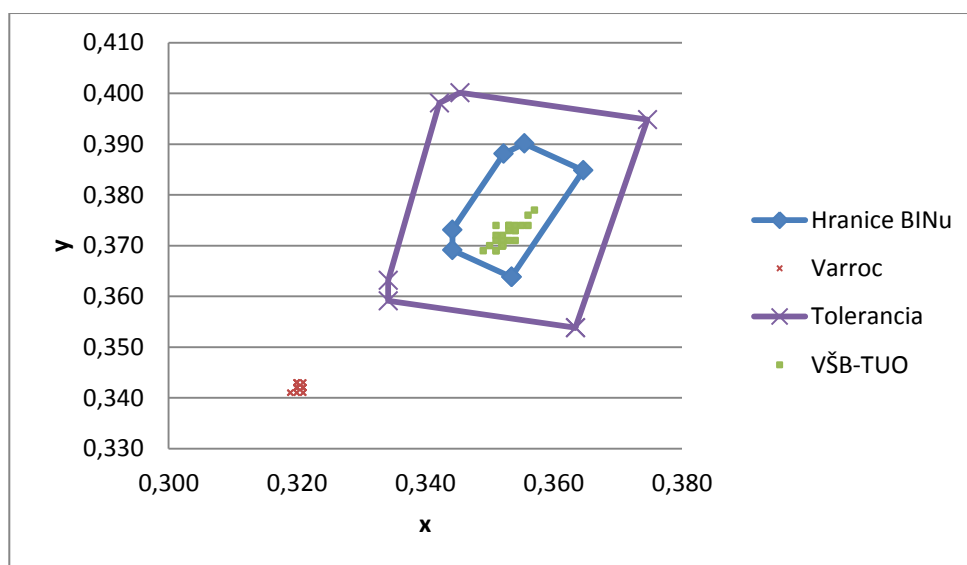
### **OSRAM LE UW D1W4 01 JM**

Poslednou LED, ktorá bola meraná v laboratóriu Varroc Lighting Systems bola LED OSRAM LE UW D1W4 01 patriaca do farebného binu JM. Štatisticky spracované výsledky merania poskytuje Tabuľka 7.17:

Tabuľka 7.17: Porovnanie nameraných hodnôt LED LE UW D1W4 JM

Meranie	Varroc		VŠB-TUO		Rozdiel	
Súradnice	x	y	x	y	x	y
<b>Priemer</b>	0,32	0,342	0,3526	0,3717	0,0326	0,0297
<b>Medián</b>	0,32	0,342	0,352	0,371	0,032	0,029
<b>Modus</b>	0,32	0,342	0,352	0,37	0,032	0,028
<b>75% kvartil</b>	0,321	0,342	0,35375	0,37375	0,033	0,031
<b>25% kvartil</b>	0,32	0,342	0,352	0,37	0,031	0,028
<b>Minimum</b>	0,319	0,341	0,349	0,369	0,029	0,026
<b>Maximum</b>	0,321	0,343	0,357	0,377	0,038	0,036
<b>Rozptyl</b>	$6 \cdot 10^{-4}$	0,000669	0,001793	0,002149	0,001988	0,002292

Grafické porovnanie výsledkov meraní v jednotlivých laboratóriách a hranicami farebného binu, ktorý definuje výrobca znázorňuje Obrázok 7.32:



Obrázok 7.32: Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Osram D1W4

### 7.5.2 Záver experimentu

Pri experimente bol zistený zásadný posun nameraných farebných súradníc oproti meraniam v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava. Priemerný posun farebných súradníc bol 0,031 pre súradnice x a 0,027 pre súradnice y. Tento rozdiel môže byť spôsobený niekoľkými skutočnosťami, napríklad nesprávnou kalibráciou spektrometra pre meranie vyžarovacích súradníc, prípadne poškodením optického vlákna, ktoré spája spektrometer s integračnou guľou.

Iným dôvodom, ktorý by mohol vysvetliť skutočnosť, že hodnoty namerané v dvoch rozdielnych laboratóriách sa značne líšia je iná konfigurácia mriežky spektrometra. V laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava je mriežka spektrometra konfigurovaná na meranie vlnových dĺžok v rozsahu 300 – 1100 nm, spektrometer v laboratóriu Varroc Lighting Systems je konfigurovaný pre meranie v rozsahu 200 – 1100 nm. Tento rozdiel však zmeny v presnosti merania nemôže spôsobiť, nakoľko LED vyžaruje len vo viditeľnom spektre, navyše rozlíšenie spektrometra výrobcu pre oba typy mriežkovania uvádza zhodné, t.j. 2,4 nm. Takisto rozptyl svetla spektrometra, ktoré uvádza výrobca je pre obidva spektrometre rovnaký – 0,04% – 0,1%.

Tento záver potvrdzuje aj skutočnosť, že pri meraní farebných súradníc v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava všetky zadané LED odpovedali definíciám farebných binov, do ktorých boli zaradené, ale pri meraní v laboratóriu Varroc Lighting Systems sa ani jedna meraná LED nenachádzala v tolerancii jej farebného binu.

Možnosť, že by ani jedna z meraných LED nebola výrobcom klasifikovaná do správneho farebného binu sa zdá veľmi nepravdepodobná.

## 7.6 Hypotéza č. 4

**Hypotéza:** S rastúcou teplotou P-N prechodu LED rastie elektrický prúd pretekajúci LED.

**Experiment:** Meranie elektrického prúdu pri raste teploty P-N prechodu.

**Postup experimentu:** Experiment spočíval v nastavení nominálneho prúdu a teploty podľa katalógového listu výrobcu. Po ustálení LED bola odčítaná hodnota a teplota povrchu zvýšená o 10 °C pomocou zostavy na chladenie použitej pri overovaní hypotéz č. 1 a 2. Nasledovalo opäť tepelné ustálenie LED a zaznamenanie elektrického prúdu, ktorý pretekal cez LED.

Experiment prebiehal v nasledujúcich krokoch:

1. Zapojenie obvodu podľa schémy na Obrázku 7.3.
2. Nastavenie nominálneho prúdu LED podľa katalógového listu výrobcu, nastavenie teploty povrchu LED podľa katalógového listu výrobcu.
3. Zaznamenanie hodnoty elektrického prúdu pretekajúceho LED.
4. Zvýšenie teploty povrchu LED o 10 °C pomocou regulácie chladiaceho výkonu Peltierovho článku, teplotná stabilizácia LED.
5. Opakovanie bodov 3 a 4 až po vrchnú hranicu teploty povrchu.

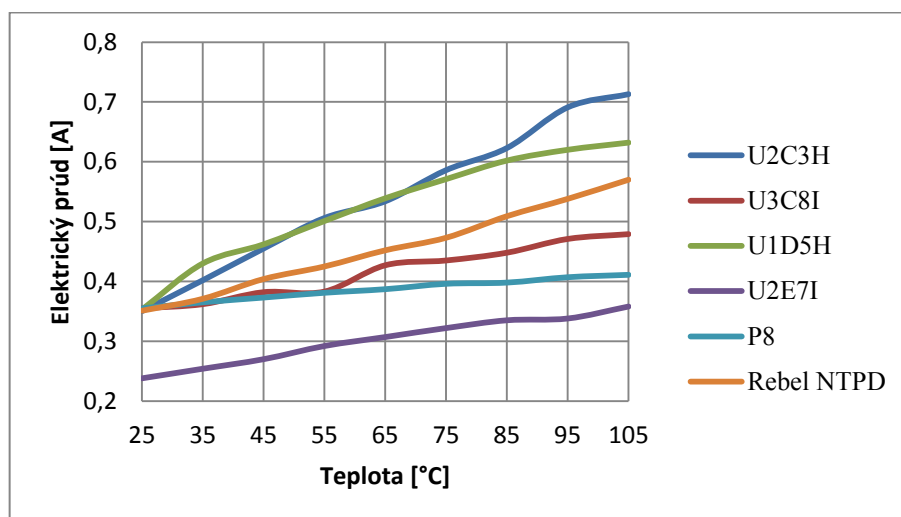
### 7.6.1 Výsledky experimentu

Namerané hodnoty LED Seoul Z5, Seoul P8 a Luxeon Rebel sú znázornené v Tabuľke 7.18:

Tabuľka 7.18: Výsledky meraní zmeny elektrického prúdu v závislosti na  $T_p$

$T_p$ [°C]	I [mA]					
	Z5 U2C3H	Z5 U3C8I	Z5 U1D5H	Z5 U2E7I	P8	Rebel
25	0,3503	0,355	0,353	0,238	0,355	0,351
35	0,402	0,362	0,43	0,254	0,365	0,371
45	0,455	0,382	0,462	0,27	0,373	0,404
55	0,506	0,383	0,501	0,292	0,381	0,425
65	0,534	0,427	0,539	0,307	0,387	0,452
75	0,586	0,435	0,571	0,322	0,396	0,473
85	0,623	0,448	0,602	0,335	0,398	0,509
95	0,691	0,471	0,62	0,338	0,407	0,538
105	0,713	0,479	0,632	0,358	0,411	0,57

Grafickú reprezentáciu nameraných hodnôt predstavuje Obrázok 7.33:



Obrázok 7.33: Závislosť elektrického prúdu na  $T_p$  meraných LED

### 7.6.2 Záver experimentu

Ako je vidno z Tabuľky 7.11 a Obrázku 7.26, s rastúcou teplotou P-N prechodu rastie aj elektrický prúd, ktorý LED preteká. Zvýšenie teploty P-N prechodu má za následok zvýšenie elektrického prúdu pretekajúceho LED, ale rovnako tak zvýšenie elektrického prúdu LED spôsobuje rýchlejšie zohrievanie LED. Vzájomné ovplyvňovanie týchto dvoch veličín, ktoré



môže v konečnom dôsledku viesť až k poškodeniu, prípadne zničeniu LED. Preto je dôležité, aby pri aplikáciách v praxi bolo zabezpečené dostatočné chladenie a regulácia elektrického prúdu LED.

Pri meraní sa opäť vyskytla anomália LED Seoul Z5 U2E7I. Túto LED nebolo možné teplotne a prúdovo ustáliť na  $T_p = 25\text{ °C}$  a  $I = 350\text{ mA}$ , preto som zvolil alternatívu zachovať teplotu prechodu na úkor zníženia elektrického prúdu.

Z Obrázku 7.26 zároveň môžeme pozorovať, že LED Z5 od výrobcu Seoul spadajúce do napäťového binu H (U2C3H a U1D5H) majú podobnú charakteristiku rastu elektrického prúdu v závislosti na teplote P-N prechodu. To isté môžeme povedať o strmosti rastu krivky závislosti  $I$  na  $T_j$  pre LED patriace do napäťového binu I (U3C8I a U2E7I).

## 8 Návrh riešenia pre spoločnosť Varroc Lighting Systems

### 8.1 Špecifikácia problému

Spoločnosť Varroc Lighting Systems požadovala praktické overenie kalibrácie ich spektrometra a integračnej gule. Tomuto problému sa venovala predchádzajúca kapitola.

Ďalšou požiadavkou zo strany spoločnosti bolo vytvorenie softwarového riešenia, ktoré by umožnilo jednoduchú identifikáciu LED odmeranej na ich spektrometre a integračnej guli. Ich pôvodná predstava bola vytvorenie makra v programe Microsoft Office Excel. Po niekoľkých konzultáciách sme nakoniec dospeli ku konsenzu, že pre vývoj aplikácie bude použitý software LabVIEW od spoločnosti National Instruments.

Výsledné riešenie obsahuje niekoľko ďalších modulov nad rámec požiadaviek spoločnosti Varroc Lighting Systems. Potreby týchto častí softwaru vzišli z potrieb praxe, ktoré som mal možnosť pozorovať pri práci počas letných prázdnin. Jednotlivé časti softwaru budú popísané v nasledujúcich podkapitolách, stručná a kompletná užívateľská príručka budú potom súčasťou Prílohy D (užívateľská príručka) a Prílohy E (softwarová dokumentácia). Obidva dokumenty sú vytvorené v anglickom jazyku, toto bolo požiadavkou zo strany spoločnosti.

### 8.2 LabVIEW

Slovo LabVIEW je skratka slov Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench. Je to systémová platforma, ktorá predstavuje vizuálny programovací jazyk od spoločnosti National Instruments. Použitý programovací jazyk sa nazýva „G“ programovací, čo evokuje jeho grafickú orientáciu. Jeho najnovšia verzia LabVIEW 2012 bola vydaná v auguste 2012.

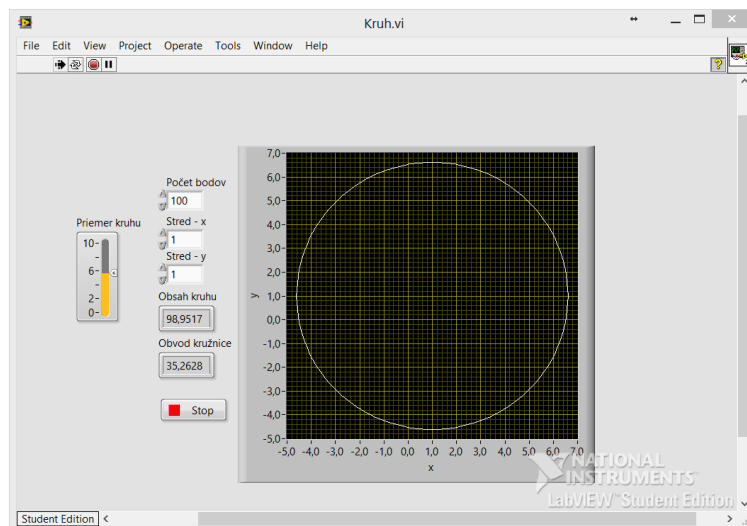
Táto softwarová platforma je primárne určená na automatizáciu meraní, automatizáciu v priemysle a získavanie a vyhodnocovanie nameraných údajov v reálnom čase.

Základnými prvkami tejto platformy sú:

- Čelný panel – interaktívne grafické rozhranie (GUI), ktoré ovláda koncový užívateľ. V prostredí LabVIEW je táto časť nazvaná Front Panel. Obsahuje všetky ovládacie prvky programu, ktoré je možné ovládať pomocou klávesnice alebo myši,
- Bloková schéma – vo vývojovom prostredí nazvaná Block Diagram. Obsahuje samotnú funkčnosť programu. Je vytvorené ikonami, ktoré reprezentujú ovládacie prvky z čelného panelu a vykonávajú samotnú funkčnosť programu.

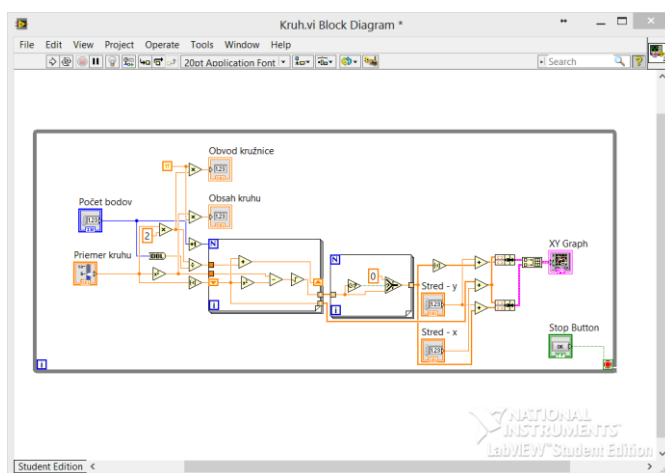
Prvky na čelnom paneli môžu byť buď ovládače (controls), alebo indikátory (indicators). Ovládače simulujú vstupné zariadenia, prípadne priestor pre interakciu a zadávanie hodnôt užívateľom. Túto kategóriu reprezentujú napr. polia pre zadávanie textu, čísel, tlačidlá, otočné a posuvné ovládače a pod. Indikátory slúžia na zobrazovanie výsledkov, hodnôt a výstupov aplikácie smerom k užívateľovi.

Na Obrázku 8.1 je zobrazený jednoduchý čelný panel. Prvky Priemer kruhu, Počet bodov, Stred – x, Stred – y a tlačidlo Stop sú typickými predstaviteľmi ovládačov, prvky Obsah kruhu, Obvod kružnice a samotný graf zobrazujúci kružnicu.



Obrázok 8.1: Príklad čelného panelu v LabVIEW

Blokové schéma je možné prirovnať k zdrojovému kódu klasického textovo orientovaného programovacieho jazyka. Jednotlivé bloky (akési stavebné častice kódu) sú medzi sebou prepojené pomocou signálových ciest, pomocou ktorých si jednotlivé entity predávajú údaje. Bloky majú buď vstupné uzly, výstupné uzly, alebo obidva druhy uzlov. V rámci blokovej schémy nie sú možné spojenia vstupný uzol - vstupný uzol, ani výstupný uzol – výstupný uzol. Jednotlivé typy premenných (string, double, integer, referencia, pole doubleov) sú od seba rozlíšené farbou a hrúbkou čiary. Samozrejmosťou sú rôzne druhy cyklov (napr. while, for) a podmienok (case structure). LabVIEW rovnako umožňuje tzv. Event-driven programovanie pomocou entity Event Structure. Obrázok 8.2 ilustruje jednoduchú blokovú schému programu vytvoreného v platforme LabVIEW.

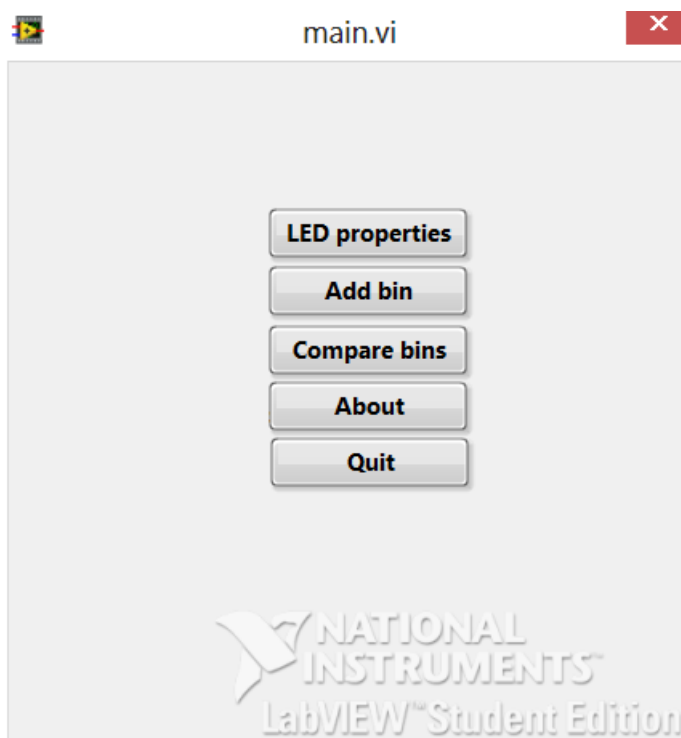


Obrázok 8.2: Príklad blokového diagramu v LabVIEW

### 8.3 Popis programu

Návrh riešenia pre VLS je program vytvorený v platforme LabVIEW 2012 so študentskou licenciou a operačnom systéme Windows 8 Pro N 64-bit. Keďže je spoločnosť VLS medzinárodná, je celý program a všetka jeho dokumentácia v anglickom jazyku. Program bude prezentovaný v spoločnosti VLS, a v prípade záujmu bude vytvorený spustiteľný inštalračný súbor, ktorý umožní jeho inštaláciu na počítače s operačným systémom Windows bez toho, aby na nich bola nainštalovaná platforma LabVIEW.

Program sa skladá z troch základných funkčných modulov – LED properties, Add bin a Compare bins. Prístup k jednotlivým modulom je umožnený cez hlavné menu programu.

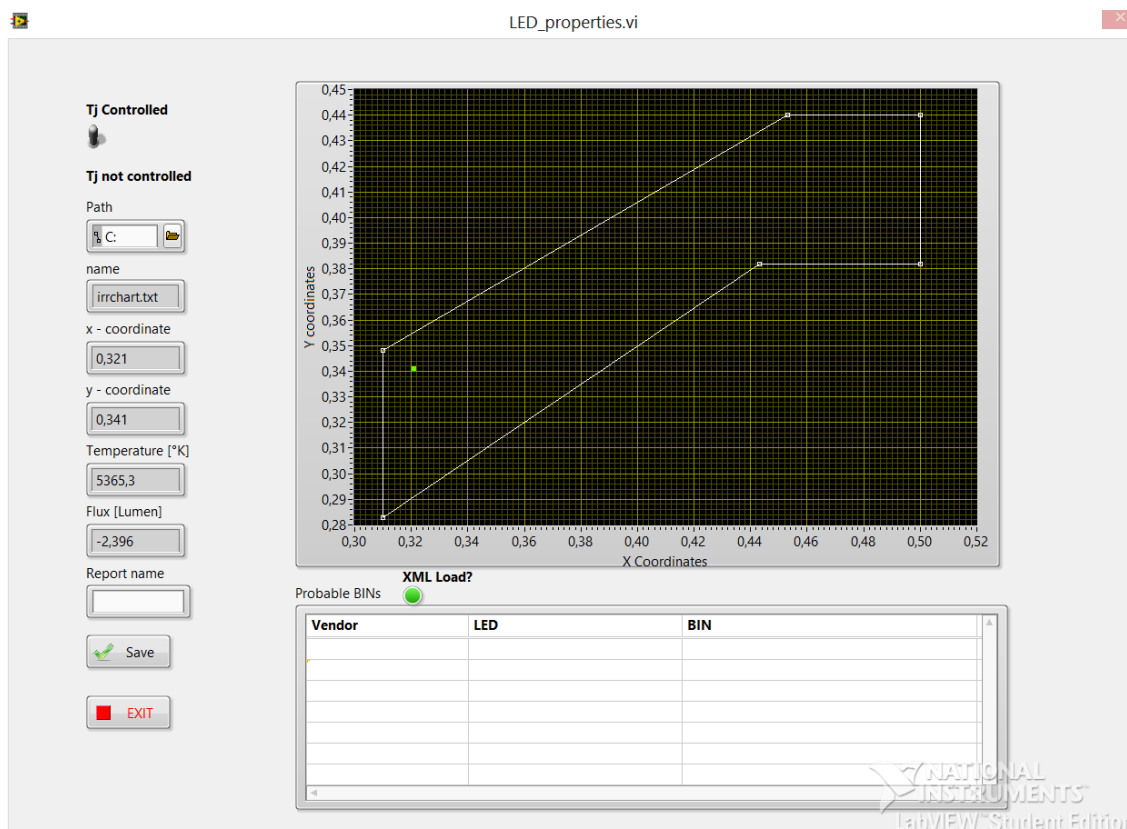


Obrázok 8.3: Hlavné menu programu

#### 8.3.1 Modul LED properties

Modul LED properties má za úlohu informovať o pravdepodobnom umiestnení LED v binoch výrobcov. Vzhľadom na to, že biny rozličných výrobcov sa prekrývajú, nie je možné jednoznačne určiť, o ktorého výrobcu sa jedná. Program načítava hodnoty z textového súboru uloženého ako výstup z integračnej gule a spektrometra v spoločnosti VLS. Na základe toho, že štruktúra textového dokumentu je známa, program v ňom vyhľadáva konkrétne kľúčové znaky a z nich potom určuje hodnotu jednotlivých parametrov. Súčasťou modulu je aj tabuľka, kde užívateľ vidí, do ktorého binu môže zameraná LED patriť. Vzhľadom k faktu, že výrobcovia udávajú hodnoty farebných súradníc s určitou toleranciou, nie je možné brať zobrazené biny ako presné určenie. Ide skôr o približné biny, v ktorých sa môže LED vyskytovať. Spoločnosť VLS bola o tejto skutočnosti informovaná a na základe jej reakcie bol uznesený konsenzus, že toto správanie je akceptovateľné, vzhľadom na to, koľko prostriedkov by bolo potrebných pre spresnenie identifikácie LED.

Pri spustení modulu je potrebné zadať cestu k textovému súboru vygenerovaného softwarom spektrometra. Po zvolení tohto súboru sa načíta jeho obsah, hodnoty sa zapíšu do indikátorov a zobrazí sa umiestnenie farebnej súradnice LED. Výstup z modulu je možné uložiť vo formáte JPG, s farebnou hĺbkou 32 bitov. Uloží sa snímka aktuálnej obrazovky, názov obrázku bude odpovedať textu zadanému do textového poľa Report name. Rozhranie takisto obsahuje indikátor úspešného načítania XML súboru, s ktorým modul pracuje. Snímok užívateľského rozhrania ilustruje Obrázok 8.4.



Obrázok 8.4: Užívateľské rozhranie modulu LED Properties

V module je takisto možné nastaviť, či bola teplota P-N prechodu monitorovaná, alebo nie, pomocou prepínača. V prípade, že užívateľ zvolí možnosť **T<sub>j</sub> not controlled**, program odpočíta od súradníc uložených v textovom súbore priemernú hodnotu posunu farebných súradníc podľa výsledkov meraní uvedených v tejto diplomovej práci ako hypotéza č. 1 (tj. 0,011 pre súradnice x a 0,018 pre súradnice y).

### 8.3.2 Modul Add Bin

Tento modul má na starosti pridávanie záznamov do XML súboru, ktorý slúži ako databáza jednotlivých binov. XML súbor bol zvolený z dôvodu jeho univerzálnosti, pričom bol braný dôraz na budúce aplikácie, ktoré by mohli takúto databázu využívať. Samotné umiestnenie je XML súboru je v inštalačnom adresári programu a má názov bindatabase.xml. V budúcnosti by umiestnenie tohto súboru mohlo byť zmenené podľa požiadavky užívateľa, prípadne by tento súbor mohol byť umiestnený niekde na sieťové úložisko, ktorým spoločnosť VLS disponuje. Keďže však šlo len o návrh riešenia, spoločnosť VLS súhlasila s takýmto

riešením. V prípade, že sa spoločnosť VLS rozhodne tento software aplikovať, bude táto funkcionality dodaná priamo podľa ich špecifikácií a požiadaviek.

Pre lepšiu ilustráciu a popis programu je potrebný pohľad na jeho užívateľské rozhranie, ktoré je zobrazené na Obrázku 8.4:

Obrázok 8.5: Užívateľské rozhranie modulu Add bin

Potom, čo užívateľ vyplní formulár, ktorý obsahuje základné informácie ako meno výrobcu, názov LED, označenie farebného binu a samotné súradnice binu, stlačí tlačidlo SAVE a program uloží formulár na príslušné miesto v XML súbore, pričom súbor nie je fyzicky zapísaný na disk, ale zmeny sú zapísané do lokálnej kópie súboru v pamäti programu. Štruktúra XML je navrhnutá tak, aby súbor bol čo najmenší, ale bola zachovaná možnosť jeho využitia v iných aplikáciách. Hodnoty x5, x6, y5 a y6 sú do súboru zapísané len v prípade, že nie sú nulové.

Program je navrhnutý tak, aby užívateľ musel zadať názov výrobcu, názov LED a názov binu. V opačnom prípade bude upozornený dialógovým oknom, že sú tieto polia prázdne. Do súboru sa nepripisujú žiadne duplicity, každý záznam je unikátny a zapísaný na konkrétne miesto tak, aby zodpovedal zadaným hodnotám. Pre lepšiu ilustráciu, ak výrobca, ktorý bol zadaný vo formulári už existuje v XML súbore, nie je do neho pripísaný znova, ale program sa nastaví na konkrétne miesto v XML súbore a pokračuje v hľadaní, či nie je niektorý údaj z formulára duplicitný.

Základná štruktúra XML dokumentu má nasledujúci tvar:

```
<xml>
  <Vendor>
    <Vendor_Name></Vendor_Name>
    <BIN>
      <BIN_label></BIN_label>
      <Coordinates>
        <x1></x1>
        <x2></x2>
        <x3></x3>
        <x4></x4>
        <y1></y1>
        <y2></y2>
        <y3></y3>
        <y4></y4>
      </Coordinates>
      <LED>
        <LED_name></LED_name>
      </LED>
    </BIN>
  </Vendor>
</xml>
```

Keďže platforma LabVIEW používa pre porovnávanie znakov ich hodnotu podľa ASCII tabuľky, je vstup textových polí ošetrený tak, aby nezáležalo na tom, či je písmeno napísané kapitálkou, alebo nie. V prípade výrobcu program upraví zadanú hodnotu tak, aby bolo v reťazci prvé písmeno veľké a ostatné malé (tzn. ak užívateľ zadá slovo „výRoBCa“, program slovo upraví na „Výrobca“). Názov LED a označenie binu sú vždy prevedené celé na veľké písmená. Tento XML súbor obsahuje len definície niekoľkých binov. Podľa pokynov zo spoločnosti VLS nebolo potrebné vytvárať kompletnú databázu všetkých farebných binov. Tento pokyn bol zdôvodnený tým, že pokiaľ bude program nasadený do praxe, bude databáza vybudovaná spoločnosťou VLS.

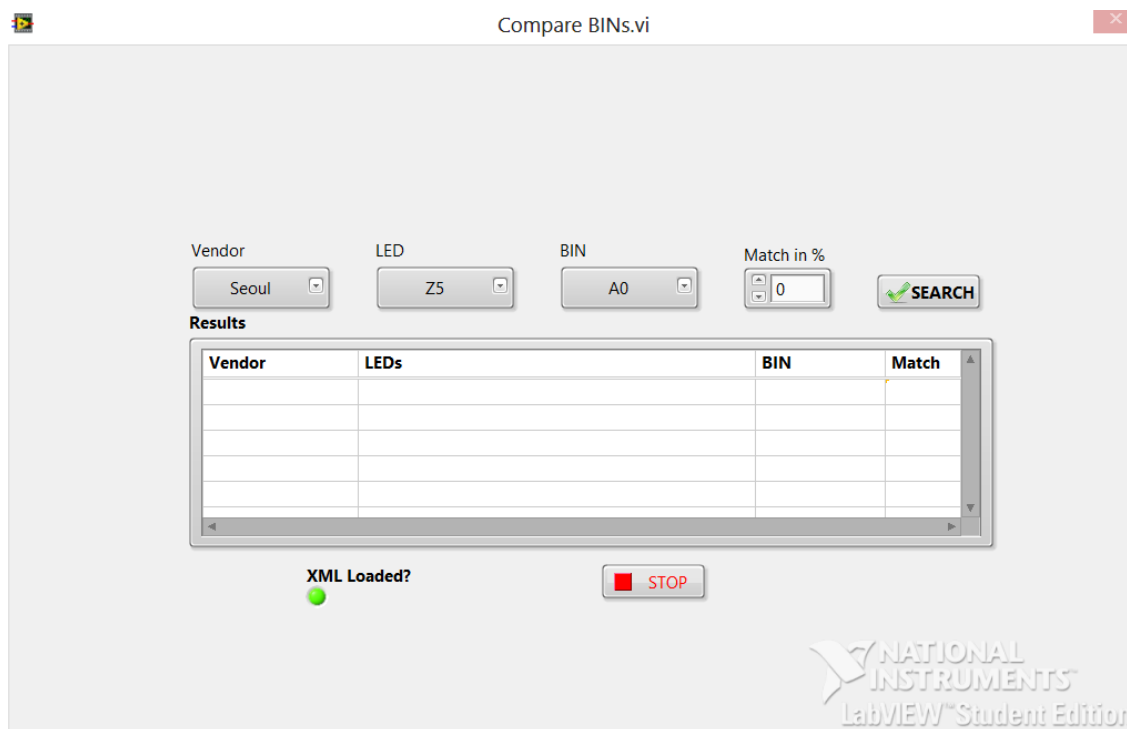
Program fyzicky uloží XML súbor po stlačení tlačidla STOP, o čom je užívateľ informovaný dialógovým oknom. Rovnako bola do programu zabudovaná funkcia automatického ukladania, ktorá uloží súbor po minúte nečinnosti, tzn. ak užívateľ minútu do formulára nič nenapíše.

### 8.3.3 Modul Compare bins

Táto časť modulu slúži na vyhľadávanie binov, ktoré sa s užívateľom zadaným binom zhodujú na užívateľom zadanom percente plochy. Tento modul vzišiel z požiadaviek praxe. Často sa pri vývoji svetelnej funkcie pracuje s niekoľkými konceptmi, pri ktorých sú použité rôzne LED rôznych výrobcov. Často dochádza k situáciám, kedy je potrebné zadanú LED vymeniť za inú (či už z dôvodu zmeny dodávateľa, alebo v prípade potreby iných parametrov). V takomto prípade je vhodné využiť práve tento modul, ktorý dokáže nájsť iné LED, ktoré

svietia rovnakou alebo podobnou farbou (majú rovnaké alebo podobné farebné súradnice), ale ostatné ich parametre sa môžu líšiť.

Ovládanie programu je jednoduché, čelný panel aplikácie pozostáva z výberových menu, textového poľa, do ktorého sa zadáva percento zhody plôch, tlačidiel na vyhľadávanie a ukončenie behu programu a tabuľky, v ktorej sa zobrazujú výsledky. Bližší pohľad na čelný panel je možné nájsť na Obrázku 8.6:



Obrázok 8.6: Užívateľské rozhranie modulu Compare bins

Platforma LabVIEW umožňuje export tabuľky do programu Microsoft Office Excel. Tento export je podporovaný natívne, preto nie sú potrebné žiadne ďalšie doplnky.



---

## 9 Záver

Diplomová práca sa zaoberala problematikou merania farebných súradníc vyžarovaných LED. V teoretickej časti boli opísané základné rozdelenie zdrojov svetla a základné fyzikálne princípy ich fungovania. Porovnala parametre, ktoré sú pre jednotlivé aplikácie dôležité. Rovnako ponúkla základný prehľad o medzinárodných normách, ktoré sa zaoberajú farbou vonkajšieho osvetlenia v automobilovom priemysle. Ukázala základné optické prvky, ktoré sa používajú v automobilovom priemysle. Takisto opísala spôsob delenia LED do binov a postup výroby LED vyžarujúcich biele svetlo vhodné pre vonkajšie osvetlenie v automobilovom priemysle.

V praktickej časti boli vykonané merania rozdielnych charakteristík a ich závislosti na teplote P-N prechodu. Prvou hypotézou bolo, že zmena teploty P-N prechodu má vplyv na posun farebných súradníc. Táto hypotéza sa po spracovaní nameraných údajov štatistickými metódami potvrdila. Zároveň sa ukázalo, že výrobca Seoul nesprávne označuje teplotu, pri ktorej sa definujú farebné biny ako teplotu okolitého prostredia. Ukázalo sa, že pre dosiahnutie hodnôt uvedených v katalógovom liste je dôležitejšia kontrola teploty P-N prechodu, ako kontrola teploty prostredia. Overovanie takisto stanovilo priemernú hodnotu posunu farebných súradníc pri zmene teploty P-N. Farebné súradnice zadaných LED odpovedali definíciám binov, ktoré uvádzajú výrobcovia a do ktorých boli klasifikované.

Druhá hypotéza sa zaoberala meraním spektrálnych charakteristík LED pri rôznych teplotách P-N prechodu. Výsledky experimentov ukázali, že pri všetkých LED dochádza s nárastom teploty P-N prechodu k zmenám v spektrálnej charakteristike LED. Zmeny sú očividné v dvoch oblastiach – v okolí 440 nm a v okolí 560 nm. Pri vlnovej dĺžke 440 nm je možné s rastúcou teplotou pozorovať pokles intenzity modrej LED. Zmena spektra luminoforu, ktoré má špičku spektra v oblasti okolo 560 nm, nie je pri všetkých LED rovnaká, pri niektorých LED má zohriate vrstvy luminoforu väčší vplyv na jeho spektrum, pri niektorých zmena spektra nie je výrazná. Tvar nameraných spektier pri  $T_p = 25\text{ °C}$  však nie úplne odpovedali tvarom spektier, ktoré výrobcovia uvádzajú vo svojich katalógových listoch.

Hypotéza číslo tri sa zaoberala meraním farebných súradníc v laboratóriu spoločnosti Varroc Lighting Systems. Poukázala na pravdepodobnosť nesprávnej konfigurácie spektrometra v laboratóriu spoločnosti Varroc Lighting Systems.

Posledná, štvrtá hypotéza, sa zaoberá meraním zmeny elektrického prúdu LED pri zmene teploty P-N prechodu. Merania všetkých LED ukázali, že s rastúcou teplotou P-N prechodu rastie aj elektrický prúd pretekajúci LED.

Posledná časť práce sa venuje popisu aplikácie, ktorá bola v rámci diplomovej práce vytvorená pre vyhodnocovanie výsledkov merania farebných súradníc v laboratóriu Varroc Lighting Systems. Opisuje jednotlivé moduly aplikácie a základné princípy ich fungovania.

---

## Citovaná literatura

- [1] ŠIŠKA, Petr a František HANÁČEK. *Nekomunikační aplikace optických vláken: Skripta*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava.
- [2] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: Vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-0494-9.
- [3] LUKÁŠ, Michal. *Co je laserová technologie?* [online]. [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>
- [4] VAŠÍNEK, Vladimír. *Optické komunikace III: Prezentace k přednáškám*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2013.
- [5] SCHUBERT, E. Fred. *Light-emitting diodes*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 05-218-6538-7.
- [6] *Osram Opto Semiconductors* [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: [http://www.osram-os.net/osram\\_os/EN/](http://www.osram-os.net/osram_os/EN/)
- [7] *Philips Lumileds* [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.philipslumileds.com/>.
- [8] HORAK, Ray. *Telecommunications and data communications handbook*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2007. ISBN 978-047-0396-070.
- [9] Hamamatsu SLD L8414-04 Datasheet. [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/62648/HAMAMATSU/L8414-04.html>
- [10] Renesas NX8396TS Datasheet. [Online] [Citace: 3. Marec 2013.] <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/451121/RENESAS/NX8369TS.html?>
- [11] *Seoul Semiconductors* [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://seoulsemicon.com/en/html/main/>.
- [12] *Nichia* [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.nichia.co.jp/en/>.
- [13] *Audi A8 Worldwide* [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.audi.com/com/brand/en/models/a8/a8.html>
- [14] *BMW X6 - Prehľad* [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.bmw.sk/sk/sk/newvehicles/x/x6/2012/showroom/index.html>
- [15] POYNTON, Charles. *Frequently asked questions about color* [online]. [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.poynton.com/PDFs/ColorFAQ.pdf>
- [16] Binning and LED. In: *Lithonia Lighting* [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: [http://lithonia.acuitybrands.com/Files/RTLED\\_Files/RTLED\\_WPaper\\_BinningandLED.pdf](http://lithonia.acuitybrands.com/Files/RTLED_Files/RTLED_WPaper_BinningandLED.pdf).

- [17] EHK 48. *Jednotné ustanovenia pre homologáciu vozidiel z hľadiska montáže zariadení pre osvetlenie a svetelnú signalizáciu*. Add.47/Rev.9. 2011.
- [18] GB 4785-2007. *Prescription for Installation of the External Lighting and Light-signalling devices for Motor Vehicles and Their Trailers*. 2007.
- [19] FMVSS 108. *Lamps, reflective devices, and associated equipment*. 2008.
- [20] *Tumblr: Art of the Automobile* [online]. [cit. 2013-24-03]. Dostupné z: [http://25.media.tumblr.com/tumblr\\_m44s3yRQmn1rnxn7co1\\_r3\\_500.png](http://25.media.tumblr.com/tumblr_m44s3yRQmn1rnxn7co1_r3_500.png)
- [21] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [22] BALAŠ, Zlatko, František KRASŇAN a Anton RUSNÁK. *Kolorimetrické parametre LED pásov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2011.
- [23] Arctic Cooling Freezer 7 Pro. CZC [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: [http://www.czc.cz/arctic-cooling-freezer-7-pro\\_2/33866/produkt](http://www.czc.cz/arctic-cooling-freezer-7-pro_2/33866/produkt)
- [24] Philips Lumileds LED Lightning. *Luxeon LED Thermal Measurement Guidelines* [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.philipslumileds.com/uploads/10/AB33-pdf>
- [25] ŽIDEK, Jan. *Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava. 2002.

---

## Zoznám obrázkov a ilustrácií

Obrázok 1.1:	Rozdelenie zdrojov svetla v telekomunikáciách .....	4
Obrázok 1.2:	Princíp stimulovanej emisie .....	5
Obrázok 1.3:	Závislosť emitovaného optického výkonu na budiacom prúde .....	6
Obrázok 1.4:	Závislosť prahového napätia na teplote čipu .....	7
Obrázok 1.5:	Spontánna emisia, $E_{hv} \approx E_2 - E_1$ .....	7
Obrázok 1.6:	Watt-Ampérová charakteristika a) LED, b) ELED, c) SLED .....	9
Obrázok 1.7:	Halogénová žiarovka Osram SILVERSTAR 2.0 .....	10
Obrázok 1.8:	Xenónová žiarovka Osram XENARC Original .....	11
Obrázok 1.9:	Emisné spektrum bielej LED (luminozor budovaný modrým svetlom) .....	12
Obrázok 2.1:	Základná schéma optickej prenosovej trasy .....	13
Obrázok 2.2:	Spektrálna šírka LED a laserovej diódy .....	14
Obrázok 2.3:	Vybrané optické parametre Hamamatsu SLD L8414-04 .....	14
Obrázok 2.4:	Vybrané parametre laserovej diódy Renesas NX8369TS .....	16
Obrázok 3.1:	Spektrum svetla pre: a) warm white, b) neutral white, c) cool white .....	19
Obrázok 3.2:	P/I charakteristika Seoul Z5 SZW05A0A .....	20
Obrázok 4.1:	Farebný priestor podľa CIE 1931 .....	23
Obrázok 4.2:	Definícia bieleho svetla podľa EHK 48 .....	26
Obrázok 5.1:	Svetlovod automobilu Audi A6 2012 .....	28
Obrázok 5.2:	Typický tvar zubov na začiatku a konci svetlovodu .....	29
Obrázok 5.3:	Gulový reflektor so zdrojom umiestneným mimo geometrický stred reflektoru .....	30
Obrázok 5.4:	Parabolický reflektor .....	30
Obrázok 5.5:	Elipsoidný reflektor so zdrojom pred ohniskom elipsy .....	31
Obrázok 5.6:	Porovnanie tvaru Fresnelovej a klasickej šošovky .....	32
Obrázok 5.7:	Princíp funkcie Fresnelovej šošovky .....	32
Obrázok 5.8:	Princíp funkcie refraktoru .....	33
Obrázok 5.9:	Denné svietenie vozidla Range Rover Evoque postavené na refraktore .....	33
Obrázok 5.10:	Princíp funkcie kolimátoru .....	34
Obrázok 6.1:	Farebné biny LED OSRAM LE UW DIW4 01 .....	37
Obrázok 6.2:	Definícia farebných binov LED Seoul Z5 SZW05A0A .....	37
Obrázok 7.1:	Schéma kontrolovania teploty P-N prechodu LED .....	44
Obrázok 7.2:	Snímka zostavy pre regulovanie teploty P-N prechodu LED .....	44
Obrázok 7.3:	Schéma zapojenia LED .....	45
Obrázok 7.4:	Nastavenie spektrometra pre meranie vyžarovacej charakteristiky .....	46
Obrázok 7.5:	Rozloženie tepla dosky z osadenou LED Seoul Z5 .....	48
Obrázok 7.6:	Osadená LED Seoul Z5 .....	48
Obrázok 7.7:	Porovnanie nameraných farebných súradníc Z5 U2C3H s údajmi výrobcu .....	49
Obrázok 7.8:	Porovnanie nameraných farebných súradníc Z5 U2E7I s údajmi výrobcu .....	50
Obrázok 7.9:	Porovnanie nameraných farebných súradníc Z5 U3C8I s údajmi výrobcu .....	51
Obrázok 7.10:	Porovnanie nameraných farebných súradníc Z5 U1D5H s údajmi výrobcu ..	52
Obrázok 7.11:	Rozloženie tepla dosky z osadenou LED Seoul P8 .....	53
Obrázok 7.12:	Osadená LED Seoul P8 .....	53

Obrázok 7.13:	Rozdiel v farebných súradniciach LED Seoul P8 pri zmene teploty $T_p$ .....	54
Obrázok 7.14:	Rozloženie tepla dosky osadenou LED Luxeon Rebel.....	55
Obrázok 7.15:	Osadená LED Luxeon Rebel NTPD.....	56
Obrázok 7.16:	Porovnanie nameraných farebných súradníc Rebel NTPD s údajmi výrobcu.	57
Obrázok 7.17:	Teplota povrchu LED OSRAM LE UW D1W4 01 JM.....	57
Obrázok 7.18:	LED Osram LE UW D1W4 osadená na hliníkovom chladiči .....	58
Obrázok 7.19:	Porovnanie nameraných farebných súradníc LED Osram LE UW D1W4 s údajmi výrobcu. ....	59
Obrázok 7.20:	Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 U2C3H v závislosti na $T_p$ ..	61
Obrázok 7.21:	Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 U2C3H v závislosti na $T_p$ ..	61
Obrázok 7.22:	Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 U3C8I v závislosti na $T_p$ ....	62
Obrázok 7.23:	Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 U1D5H v závislosti na $T_p$ ..	63
Obrázok 7.24:	Zmena spektrálnej charakteristiky LED Seoul Z5 P8 v závislosti na $T_p$ .....	63
Obrázok 7.25:	Zmena spektrálnej charakteristiky LED Luxeon Rebel v závislosti na $T_p$ .....	64
Obrázok 7.26:	Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Z5 U2C3H.....	66
Obrázok 7.27:	Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Z5 U2E7I.....	67
Obrázok 7.28:	Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Z5 U3C8I .....	68
Obrázok 7.29:	Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Z5 U1D5H.....	69
Obrázok 7.30:	Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc LED Seoul P8.....	70
Obrázok 7.31:	Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Rebel NTPD ..	71
Obrázok 7.32:	Porovnanie nameraných hodnôt farebných súradníc pre LED Osram D1W4	72
Obrázok 7.33:	Závislosť elektrického prúdu na $T_p$ meraných LED .....	74
Obrázok 8.1:	Príklad čelného panelu v LabVIEW.....	77
Obrázok 8.2:	Príklad blokového diagramu v LabVIEW .....	77
Obrázok 8.3:	Hlavné menu programu .....	78
Obrázok 8.4:	Užívateľské rozhranie modulu LED Properties .....	79
Obrázok 8.5:	Užívateľské rozhranie modulu Add bin.....	80
Obrázok 8.6:	Užívateľské rozhranie modulu Compare bins.....	82

---

## Zoznam tabuliek

Tabuľka 1.1:	Rozloženie farieb v spektrálnej oblasti viditeľného žiarenia.....	3
Tabuľka 3.1:	Vybrané veličiny osvetľovacej techniky.....	17
Tabuľka 3.2:	Hodnoty svetelného toku vybraných LED .....	18
Tabuľka 3.3:	Rozmery vybraných LED.....	21
Tabuľka 3.4:	Životnosť vybraných LED.....	21
Tabuľka 4.1:	Farby vybraných svetelných funkcií.....	25
Tabuľka 6.1:	Rozdelenie svetelných binov LED OSRAM LE UW D1W4 01 .....	36
Tabuľka 7.1:	Zoznam meraných LED.....	40
Tabuľka 7.2:	Zoznam prístrojov použitých pri meraní farebných súradníc LED.....	41
Tabuľka 7.3:	Výsledky meraní LED Seoul Z5 U2C3H .....	49
Tabuľka 7.4:	Výsledky meraní LED Seoul Z5 U2E7I .....	50
Tabuľka 7.5:	Výsledky meraní LED Seoul Z5 U3C8I.....	51
Tabuľka 7.6:	Výsledky meraní LED Seoul Z5 U1D5H .....	52
Tabuľka 7.7:	Výsledky meraní LED Seoul P8.....	54
Tabuľka 7.8:	Výsledky meraní LED Luxeon Rebel NTPD.....	56
Tabuľka 7.9:	Výsledky meraní LED Osram LE UW D1W4 01 JM.....	58
Tabuľka 7.10:	Zmena definície farebného binu JM v závislosti na $T_p$ .....	59
Tabuľka 7.11:	Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul Z5 U2C3H.....	66
Tabuľka 7.12:	Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul Z5 U2E7I .....	67
Tabuľka 7.13:	Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul Z5 U3C8I.....	68
Tabuľka 7.14:	Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul Z5 U1D5H .....	69
Tabuľka 7.15:	Porovnanie nameraných hodnôt LED Seoul P8.....	70
Tabuľka 7.16:	Porovnanie nameraných hodnôt LED Rebel LXML PWN1 0100 NTPD .....	71
Tabuľka 7.17:	Porovnanie nameraných hodnôt LED LE UW D1W4 JM.....	72
Tabuľka 7.18:	Výsledky meraní zmeny elektrického prúdu v závislosti na $T_p$ .....	74

---

## Zoznam príloh

Príloha A: Odporúčaný postup pri meraní chromatických súradníc v laboratóriu spoločnosti Varroc Lighting Systems .....	i
Príloha B: Výsledky merania farebných súradníc v laboratóriu Vysokej školy báňskej – Technickej univerzity Ostrava .....	iii
Príloha C: Výsledky merania farebných súradníc v laboratóriu Varroc Lighting Systems.....	x
Príloha D: Užívateľská príručka .....	xiii
Príloha E: Softwarová dokumentácia programu .....	xx

Súčasťou diplomovej práce je jej Neverejná časť a CD.

Adresárová štruktúra CD:

V hlavnom adresári je obsiahnutá samotná diplomová práca v súbore s názvom DP\_HAN479.pdf. V zložke Výsledky meraní je umiestnený súbor vysledky\_merani.xlsx. V adresári Bin Analyzer sú obsiahnuté zdrojové kódy a prvky potrebné pre správne fungovanie vytvoreného programu.

**Recommended process for measuring color coordinates in Varroc Lighting Systems laboratory**

The process of measuring color coordinates is described in this recommendation. You should follow these steps when measuring color coordinates using integration sphere and spectrometer Avantes AvaSpec-2048. Following this recommendation you will be able to evaluate measured data with Bin Analyzer software. In case you are controlling junction temperature of LED, change the switch in Bin Analyzer software to **Tj controlled**. Junction temperature should meet temperature defined by vendor in LED's datasheet.

For successful measurement and evaluation of measured data follow these steps:

1. Assembly the circuit shown in following Figure 1:

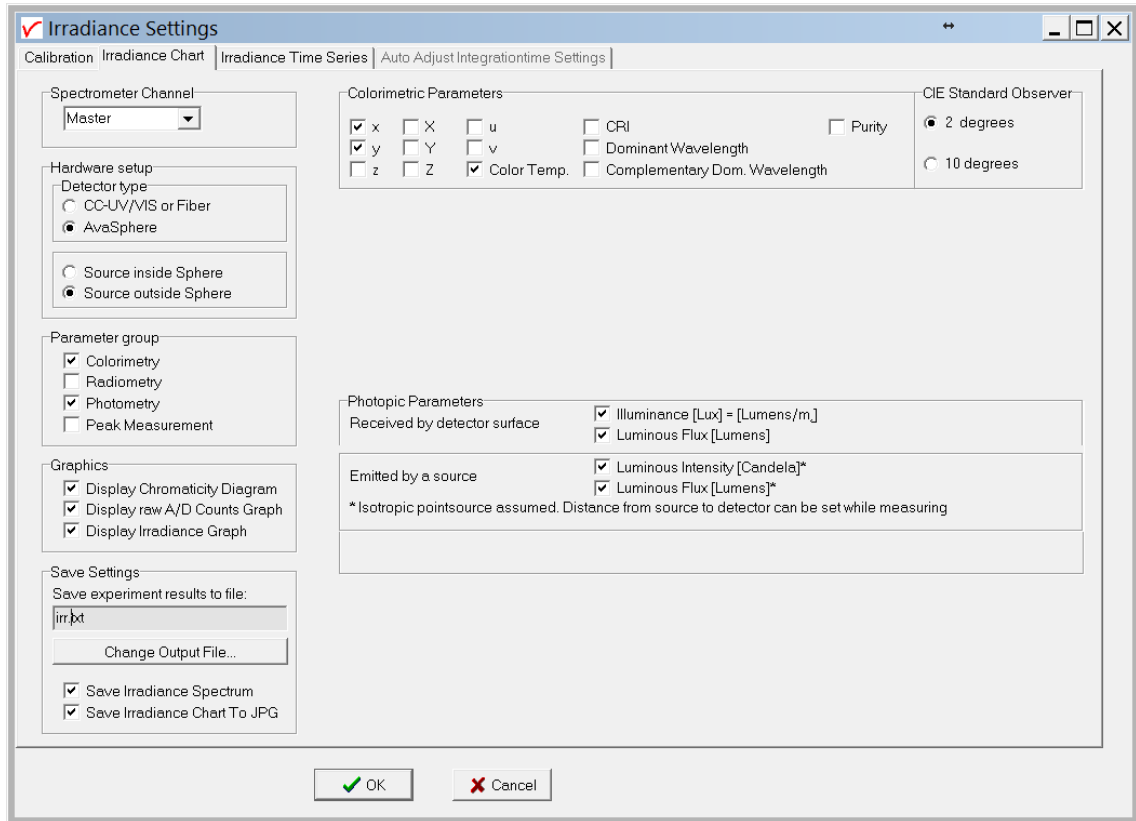


*Figure 1: Scheme of circuit for LED measurement*

2. Connect spectrometer and integration sphere with correct optical fiber
3. Connect spectrometer to computer using USB cable
4. Run spectrometer software
5. Turn on the LED, set nominal electrical current from LED's datasheet
6. Wait for LED temperature stabilization, control the current of the LED to its nominal current
7. In spectrometer control software, choose **Application** and **Absolute irradiation measurement**
8. In this window, choose **Irradiance chart** tab



9. Set the tab as shown in Figure 2:



10. Before clicking **OK** button, choose output file folder
11. Name the output file name to identify LED
12. Click **OK** button, new window will open
13. Click **Start** button
14. Block the light input of integration sphere and click black **Save dark** button
15. Put emitting LED to integration sphere's input
16. Click **AutoConfigure Integrationtime**, set Average to 30
17. For saving measured data, click **Save Data** button
18. Click **Exit** button
19. For measuring another LED, repeat steps 7 – 18

You should always change the name of output file when starting new measurement.

*Príloha B: Výsledky merania farebných súradníc v laboratóriu Vysokej školy  
báňskej – Technickej univerzity Ostrava*

Seoul Z5 U2C3H						
$T_p = 25\text{ °C}$			$T_p = 100\text{ °C}$		Rozdiel	
x	y		x	y	x	y
0,364	0,375		0,368	0,386	0,004	0,011
0,365	0,375		0,368	0,385	0,003	0,01
0,364	0,375		0,367	0,385	0,003	0,01
0,364	0,375		0,366	0,382	0,002	0,007
0,365	0,376		0,365	0,381	0	0,005
0,365	0,376		0,366	0,383	0,001	0,007
0,364	0,375		0,365	0,382	0,001	0,007
0,364	0,375		0,367	0,382	0,003	0,007
0,364	0,375		0,366	0,383	0,002	0,008
0,365	0,376		0,367	0,383	0,002	0,007
0,364	0,376		0,366	0,383	0,002	0,007
0,364	0,376		0,367	0,382	0,003	0,006
0,365	0,376		0,363	0,382	-0,002	0,006
0,364	0,375		0,367	0,383	0,003	0,008
0,364	0,375		0,366	0,383	0,002	0,008
0,364	0,375		0,366	0,383	0,002	0,008
0,364	0,376		0,366	0,383	0,002	0,007
0,364	0,376		0,365	0,381	0,001	0,005
0,365	0,375		0,365	0,382	0	0,007
0,365	0,375		0,366	0,382	0,001	0,007
0,364	0,376		0,366	0,383	0,002	0,007
0,364	0,375		0,367	0,383	0,003	0,008
0,364	0,376		0,364	0,381	0	0,005
0,365	0,376		0,365	0,381	0	0,005
0,364	0,375		0,365	0,382	0,001	0,007
0,364	0,376		0,365	0,381	0,001	0,005
0,365	0,375		0,366	0,386	0,001	0,011
0,364	0,376		0,365	0,383	0,001	0,007
0,364	0,377		0,366	0,382	0,002	0,005
0,364	0,375		0,366	0,383	0,002	0,008
Priemer	0,3643	0,3755	0,3659	0,383	0,0016	0,007
Medián	0,364	0,375	0,366	0,383	0,002	0,007
Modus	0,364	0,375	0,366	0,383	0,002	0,007
75% kvartil	0,365	0,376	0,3668	0,383	0,002	0,008
25% kvartil	0,364	0,375	0,365	0,382	0,001	0,006
Minimum	0,364	0,375	0,363	0,381	-0,002	0,005
Maximum	0,365	0,377	0,368	0,386	0,004	0,011
Rozptyl	0,00047	0,0006	0,0011	0,001	0,00125	0,002

Seoul Z5 U2E7I						
$T_p = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$			$T_p = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$		Rozdiel	
x	y		x	y	x	y
0,393	0,37		0,402	0,385	0,009	0,015
0,388	0,368		0,405	0,389	0,017	0,021
0,392	0,369		0,404	0,388	0,012	0,019
0,393	0,37		0,405	0,39	0,012	0,02
0,391	0,368		0,408	0,392	0,017	0,024
0,391	0,369		0,405	0,39	0,014	0,021
0,393	0,37		0,407	0,391	0,014	0,021
0,391	0,371		0,405	0,389	0,014	0,018
0,391	0,37		0,404	0,389	0,013	0,019
0,391	0,369		0,405	0,392	0,014	0,023
0,393	0,371		0,406	0,391	0,013	0,02
0,391	0,369		0,407	0,392	0,016	0,023
0,391	0,369		0,406	0,389	0,015	0,02
0,392	0,37		0,406	0,389	0,014	0,019
0,393	0,371		0,406	0,39	0,013	0,019
0,391	0,369		0,404	0,387	0,013	0,018
0,391	0,37		0,404	0,387	0,013	0,017
0,391	0,37		0,404	0,387	0,013	0,017
0,391	0,371		0,405	0,388	0,014	0,017
0,392	0,369		0,406	0,389	0,014	0,02
0,392	0,37		0,406	0,389	0,014	0,019
0,391	0,37		0,407	0,392	0,016	0,022
0,391	0,371		0,406	0,389	0,015	0,018
0,392	0,369		0,405	0,387	0,013	0,018
0,391	0,37		0,405	0,387	0,014	0,017
0,392	0,371		0,406	0,389	0,014	0,018
0,393	0,369		0,406	0,39	0,013	0,021
0,391	0,371		0,406	0,389	0,015	0,018
0,392	0,371		0,404	0,387	0,012	0,016
0,391	0,369		0,403	0,386	0,012	0,017
Priemer	0,391533	0,3698	0,4053	0,3890	0,0137	0,0192
Medián	0,391	0,37	0,405	0,389	0,014	0,019
Modus	0,391	0,37	0,406	0,389	0,014	0,018
75% kvartil	0,392	0,37075	0,406	0,39	0,014	0,02075
25% kvartil	0,391	0,369	0,40425	0,38725	0,013	0,018
Minimum	0,388	0,368	0,402	0,385	0,009	0,015
Maximum	0,393	0,371	0,408	0,392	0,017	0,024
Rozptyl	0,001042	0,000925	0,001285	0,001847	0,001617	0,002167

Seoul Z5 U3C8I							
T <sub>p</sub> = 25 °C			T <sub>p</sub> = 100 °C			Rozdiel	
x	y		x	y		x	y
0,352	0,379		0,36	0,385		0,008	0,006
0,35	0,373		0,359	0,383		0,009	0,01
0,351	0,377		0,36	0,385		0,009	0,008
0,352	0,379		0,357	0,387		0,005	0,008
0,352	0,376		0,357	0,358		0,005	-0,018
0,351	0,375		0,357	0,384		0,006	0,009
0,352	0,376		0,357	0,386		0,005	0,01
0,35	0,379		0,356	0,388		0,006	0,009
0,351	0,376		0,358	0,385		0,007	0,009
0,352	0,375		0,354	0,385		0,002	0,01
0,351	0,376		0,353	0,385		0,002	0,009
0,352	0,375		0,353	0,383		0,001	0,008
0,352	0,376		0,353	0,384		0,001	0,008
0,352	0,375		0,352	0,383		0	0,008
0,352	0,377		0,354	0,385		0,002	0,008
0,35	0,375		0,354	0,385		0,004	0,01
0,351	0,375		0,354	0,384		0,003	0,009
0,351	0,376		0,354	0,385		0,003	0,009
0,35	0,376		0,352	0,384		0,002	0,008
0,352	0,375		0,353	0,384		0,001	0,009
0,354	0,376		0,352	0,384		-0,002	0,008
0,352	0,376		0,354	0,385		0,002	0,009
0,352	0,377		0,353	0,384		0,001	0,007
0,351	0,374		0,353	0,385		0,002	0,011
0,355	0,376		0,355	0,385		0	0,009
0,351	0,375		0,354	0,383		0,003	0,008
0,354	0,376		0,353	0,385		-0,001	0,009
0,352	0,376		0,357	0,388		0,005	0,012
0,352	0,376		0,356	0,385		0,004	0,009
0,352	0,377		0,355	0,385		0,003	0,008
Priemer	0,3517	0,376	0,355	0,384		0,00327	0,008
Medián	0,352	0,376	0,354	0,385		0,003	0,009
Modus	0,352	0,376	0,354	0,385		0,002	0,009
75% kvartil	0,352	0,376	0,357	0,385		0,005	0,009
25% kvartil	0,351	0,375	0,353	0,384		0,00125	0,008
Minimum	0,35	0,373	0,352	0,358		-0,002	-0,018
Maximum	0,355	0,379	0,36	0,388		0,009	0,012
Rozptyl	0,00115	0,0013	0,0023	0,005		0,0028	0,005

Seoul Z5 U1D5H						
T <sub>p</sub> = 25 °C			T <sub>p</sub> = 100 °C		Rozdiel	
x	y		x	y	x	y
0,376	0,368		0,381	0,372	0,005	0,004
0,375	0,366		0,386	0,378	0,011	0,012
0,375	0,368		0,385	0,377	0,01	0,009
0,375	0,368		0,385	0,377	0,01	0,009
0,376	0,367		0,384	0,376	0,008	0,009
0,375	0,368		0,385	0,376	0,01	0,008
0,376	0,366		0,385	0,376	0,009	0,01
0,375	0,366		0,384	0,375	0,009	0,009
0,375	0,367		0,355	0,361	-0,02	-0,006
0,375	0,366		0,384	0,375	0,009	0,009
0,376	0,368		0,384	0,376	0,008	0,008
0,376	0,367		0,386	0,377	0,01	0,01
0,375	0,366		0,385	0,376	0,01	0,01
0,376	0,366		0,386	0,377	0,01	0,011
0,376	0,368		0,386	0,376	0,01	0,008
0,376	0,368		0,385	0,376	0,009	0,008
0,375	0,367		0,385	0,376	0,01	0,009
0,376	0,366		0,384	0,375	0,008	0,009
0,376	0,368		0,386	0,377	0,01	0,009
0,375	0,368		0,385	0,375	0,01	0,007
0,375	0,368		0,384	0,375	0,009	0,007
0,376	0,366		0,385	0,36	0,009	-0,006
0,375	0,367		0,385	0,377	0,01	0,01
0,375	0,367		0,385	0,376	0,01	0,009
0,376	0,366		0,384	0,376	0,008	0,01
0,375	0,366		0,384	0,376	0,009	0,01
0,375	0,368		0,385	0,377	0,01	0,009
0,375	0,368		0,384	0,376	0,009	0,008
0,375	0,368		0,386	0,378	0,011	0,01
0,376	0,368		0,384	0,375	0,008	0,007
Priemer	0,375433	0,367133	0,383733	0,375	0,0083	0,007867
Medián	0,375	0,367	0,385	0,376	0,0095	0,009
Modus	0,375	0,368	0,385	0,376	0,01	0,009
75% kvartil	0,376	0,368	0,385	0,377	0,01	0,01
25% kvartil	0,375	0,366	0,384	0,375	0,009	0,008
Minimum	0,375	0,366	0,355	0,36	-0,02	-0,006
Maximum	0,376	0,368	0,386	0,378	0,011	0,012
Rozptyl	0,000504	0,0009	0,005521	0,004102	0,005472	0,004041

Philips Rebel LXML PWN1 0100 NTPD							
T <sub>pad</sub> = 25 °C			T <sub>pad</sub> = 100 °C			Rozdiel	
x	y		x	y		x	y
0,376	0,37		0,379	0,378		0,003	0,008
0,376	0,37		0,383	0,382		0,007	0,012
0,377	0,369		0,382	0,381		0,005	0,012
0,378	0,371		0,382	0,382		0,004	0,011
0,376	0,37		0,381	0,381		0,005	0,011
0,376	0,369		0,381	0,381		0,005	0,012
0,376	0,371		0,383	0,383		0,007	0,012
0,377	0,369		0,381	0,382		0,004	0,013
0,378	0,37		0,387	0,387		0,009	0,017
0,377	0,37		0,382	0,382		0,005	0,012
0,376	0,371		0,382	0,382		0,006	0,011
0,378	0,37		0,383	0,383		0,005	0,013
0,376	0,369		0,382	0,382		0,006	0,013
0,377	0,369		0,381	0,381		0,004	0,012
0,376	0,371		0,381	0,381		0,005	0,01
0,376	0,37		0,382	0,381		0,006	0,011
0,377	0,369		0,384	0,383		0,007	0,014
0,378	0,369		0,382	0,382		0,004	0,013
0,376	0,369		0,382	0,382		0,006	0,013
0,376	0,371		0,382	0,382		0,006	0,011
0,376	0,369		0,382	0,383		0,006	0,014
0,376	0,369		0,383	0,382		0,007	0,013
0,376	0,37		0,382	0,363		0,006	-0,007
0,378	0,369		0,383	0,383		0,005	0,014
0,377	0,369		0,382	0,382		0,005	0,013
0,376	0,369		0,383	0,383		0,007	0,014
0,376	0,37		0,383	0,383		0,007	0,013
0,378	0,369		0,382	0,382		0,004	0,013
0,376	0,369		0,382	0,383		0,006	0,014
0,379	0,372		0,382	0,382		0,003	0,01
Priemer	0,3767	0,3697	0,3822	0,381		0,0055	0,012
Medián	0,376	0,3695	0,382	0,382		0,0055	0,013
Modus	0,376	0,369	0,382	0,382		0,005	0,013
75% kvartil	0,377	0,37	0,383	0,383		0,006	0,013
25% kvartil	0,376	0,369	0,382	0,381		0,005	0,011
Minimum	0,376	0,369	0,379	0,363		0,003	-0,007
Maximum	0,379	0,372	0,387	0,387		0,009	0,017
Rozptyl	0,00092	0,0009	0,0013	0,004		0,00136	0,004

Seoul P8						
T <sub>p</sub> = 25 °C			T <sub>p</sub> = 100 °C		Rozdiel	
x	y		x	y	x	y
0,338	0,354		0,344	0,361	0,006	0,007
0,339	0,354		0,345	0,362	0,006	0,008
0,339	0,354		0,344	0,361	0,005	0,007
0,339	0,354		0,345	0,359	0,006	0,005
0,339	0,355		0,345	0,36	0,006	0,005
0,339	0,354		0,344	0,361	0,005	0,007
0,338	0,355		0,345	0,36	0,007	0,005
0,338	0,353		0,345	0,36	0,007	0,007
0,338	0,354		0,345	0,361	0,007	0,007
0,339	0,354		0,345	0,361	0,006	0,007
0,339	0,354		0,344	0,361	0,005	0,007
0,338	0,353		0,344	0,358	0,006	0,005
0,339	0,353		0,344	0,36	0,005	0,007
0,338	0,352		0,344	0,361	0,006	0,009
0,337	0,352		0,344	0,36	0,007	0,008
0,338	0,353		0,346	0,361	0,008	0,008
0,338	0,352		0,345	0,361	0,007	0,009
0,338	0,352		0,345	0,362	0,007	0,01
0,338	0,352		0,344	0,361	0,006	0,009
0,337	0,352		0,345	0,36	0,008	0,008
0,338	0,354		0,343	0,36	0,005	0,006
0,337	0,357		0,345	0,36	0,008	0,003
0,339	0,355		0,345	0,36	0,006	0,005
0,338	0,354		0,346	0,361	0,008	0,007
0,338	0,357		0,344	0,361	0,006	0,004
0,337	0,354		0,344	0,361	0,007	0,007
0,338	0,353		0,345	0,361	0,007	0,008
0,337	0,354		0,345	0,361	0,008	0,007
0,338	0,354		0,344	0,361	0,006	0,007
0,338	0,354		0,344	0,361	0,006	0,007
Priemer	0,338133	0,353733	0,344567	0,3606	0,006433	0,006867
Medián	0,338	0,354	0,345	0,361	0,006	0,007
Modus	0,338	0,354	0,345	0,361	0,006	0,007
75% kvartil	0,339	0,354	0,345	0,361	0,007	0,008
25% kvartil	0,338	0,353	0,344	0,36	0,006	0,00625
Minimum	0,337	0,352	0,343	0,358	0,005	0,003
Maximum	0,339	0,357	0,346	0,362	0,008	0,01
Rozptyl	0,000681	0,001285	0,000679	0,000814	0,000971	0,00157

	Osram LE UW D1W4 01	
	$T_i = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	x	y
	0,352	0,37
	0,352	0,37
	0,354	0,371
	0,352	0,37
	0,351	0,374
	0,352	0,37
	0,351	0,372
	0,351	0,369
	0,355	0,374
	0,352	0,37
	0,357	0,377
	0,352	0,371
	0,353	0,371
	0,352	0,37
	0,352	0,371
	0,356	0,374
	0,354	0,373
	0,353	0,374
	0,352	0,372
	0,354	0,374
	0,356	0,376
	0,354	0,373
	0,35	0,37
	0,353	0,373
	0,353	0,374
	0,351	0,371
	0,351	0,369
	0,352	0,37
	0,352	0,37
Priemer	0,349	0,369
Medián	0,3526	0,3717
Modus	0,352	0,371
75% kvartil	0,352	0,37
25% kvartil	0,35375	0,3738
Minimum	0,352	0,37
Maximum	0,349	0,369
Rozptyl	0,357	0,377



*Priloha C: Výsledky merania farebných súradníc v laboratóriu Varroc Lighting Systems*

	Seoul Z5 U2C3H		Seoul Z5 U2E7I		Seoul Z5 U3C8I	
	T <sub>p</sub> = 100 °C		T <sub>p</sub> = 100 °C		T <sub>p</sub> = 100 °C	
	x	y	x	y	x	y
	0,342	0,362	0,373	0,368	0,332	0,37
	0,342	0,361	0,372	0,369	0,331	0,369
	0,341	0,362	0,372	0,369	0,332	0,37
	0,341	0,362	0,373	0,368	0,332	0,369
	0,342	0,361	0,373	0,369	0,331	0,37
	0,342	0,361	0,372	0,369	0,33	0,37
	0,342	0,362	0,371	0,368	0,332	0,369
	0,341	0,362	0,373	0,368	0,332	0,369
	0,341	0,362	0,373	0,368	0,33	0,369
	0,342	0,361	0,372	0,369	0,331	0,37
	0,342	0,361	0,371	0,369	0,332	0,37
	0,343	0,361	0,371	0,368	0,332	0,371
	0,341	0,361	0,373	0,368	0,33	0,369
	0,342	0,363	0,373	0,367	0,33	0,369
	0,342	0,362	0,372	0,369	0,331	0,37
	0,343	0,361	0,404	0,369	0,332	0,37
	0,343	0,362	0,373	0,369	0,332	0,371
	0,343	0,362	0,371	0,367	0,331	0,369
	0,341	0,362	0,373	0,368	0,33	0,37
	0,342	0,362	0,373	0,368	0,332	0,37
	0,342	0,363	0,372	0,369	0,352	0,371
	0,342	0,363	0,372	0,369	0,33	0,369
	0,342	0,361	0,373	0,369	0,331	0,369
	0,343	0,362	0,371	0,368	0,331	0,369
	0,342	0,362	0,372	0,368	0,332	0,37
	0,342	0,363	0,373	0,367	0,33	0,371
	0,341	0,362	0,373	0,369	0,33	0,37
	0,343	0,361	0,371	0,368	0,33	0,37
	0,342	0,362	0,372	0,368	0,332	0,371
	0,342	0,362	0,372	0,366	0,331	0,369
Priemer	0,34197	0,3618	0,3733	0,368267	0,3318	0,3698
Medián	0,342	0,362	0,372	0,368	0,331	0,37
Modus	0,342	0,362	0,373	0,368	0,332	0,37
75% kvartil	0,342	0,362	0,373	0,369	0,332	0,37
25% kvartil	0,342	0,361	0,372	0,368	0,33	0,369
Minimum	0,341	0,361	0,371	0,366	0,33	0,369
Maximum	0,343	0,363	0,404	0,369	0,352	0,371
Rozptyl	0,00067	0,0007	0,00585	0,000785	0,00391	0,0007

	Seoul Z5 U1D5H		Rebel NTPD		Osram D1W4 JM	
	$T_p = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_p = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_p = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	x	y	x	y	x	y
	0,343	0,344	0,348	0,353	0,32	0,342
	0,343	0,343	0,348	0,353	0,32	0,342
	0,342	0,344	0,348	0,353	0,32	0,342
	0,342	0,344	0,348	0,353	0,321	0,342
	0,342	0,343	0,348	0,352	0,32	0,343
	0,342	0,344	0,349	0,352	0,321	0,341
	0,343	0,344	0,349	0,352	0,321	0,342
	0,341	0,344	0,348	0,353	0,32	0,343
	0,341	0,343	0,348	0,353	0,32	0,343
	0,342	0,344	0,348	0,353	0,32	0,342
	0,342	0,343	0,348	0,352	0,319	0,341
	0,343	0,344	0,349	0,352	0,321	0,342
	0,341	0,344	0,349	0,352	0,32	0,341
	0,343	0,345	0,349	0,353	0,32	0,342
	0,341	0,343	0,348	0,353	0,32	0,343
	0,341	0,344	0,348	0,353	0,319	0,341
	0,342	0,344	0,349	0,352	0,321	0,342
	0,343	0,343	0,348	0,352	0,32	0,342
	0,343	0,344	0,348	0,352	0,32	0,342
	0,343	0,344	0,348	0,353	0,321	0,343
	0,343	0,343	0,348	0,353	0,321	0,342
	0,343	0,344	0,348	0,353	0,321	0,341
	0,341	0,344	0,349	0,352	0,32	0,342
	0,342	0,344	0,349	0,352	0,32	0,343
	0,343	0,344	0,348	0,352	0,32	0,342
	0,343	0,345	0,348	0,352	0,32	0,342
	0,343	0,345	0,349	0,353	0,321	0,343
	0,342	0,344	0,349	0,352	0,321	0,342
	0,341	0,343	0,349	0,352	0,32	0,341
	0,343	0,344	0,348	0,353	0,32	0,342
Priemer	0,342233	0,343833	0,34837	0,3525	0,32	0,342033
Medián	0,342	0,344	0,348	0,3525	0,32	0,342
Modus	0,343	0,344	0,348	0,353	0,32	0,342
75% kvartil	0,343	0,344	0,349	0,353	0,321	0,342
25% kvartil	0,342	0,34325	0,348	0,352	0,32	0,342
Minimum	0,341	0,343	0,348	0,352	0,319	0,341
Maximum	0,343	0,345	0,349	0,353	0,321	0,343
Rozptyl	0,000817	0,000592	0,00049	0,0005	$6 \cdot 10^{-4}$	0,000669

---

	Seoul P8	
	$T_p = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	x	y
	0,307	0,321
	0,307	0,323
	0,308	0,321
	0,308	0,321
	0,308	0,323
	0,306	0,323
	0,308	0,322
	0,307	0,321
	0,306	0,321
	0,307	0,321
	0,306	0,321
	0,308	0,323
	0,307	0,322
	0,307	0,323
	0,307	0,321
	0,307	0,321
	0,307	0,322
	0,307	0,323
	0,306	0,321
	0,308	0,321
	0,307	0,321
	0,307	0,321
	0,307	0,321
	0,307	0,321
	0,306	0,322
	0,308	0,323
	0,307	0,323
	0,308	0,321
	0,306	0,321
	0,307	0,323
Priemer	0,307067	0,321733
Medián	0,307	0,321
Modus	0,307	0,321
75% kvartil	0,30775	0,323
25% kvartil	0,307	0,321
Minimum	0,306	0,321
Maximum	0,308	0,323
Rozptyl	0,000691	0,000907

### **User guide for Bin analyzer (v1.0)**

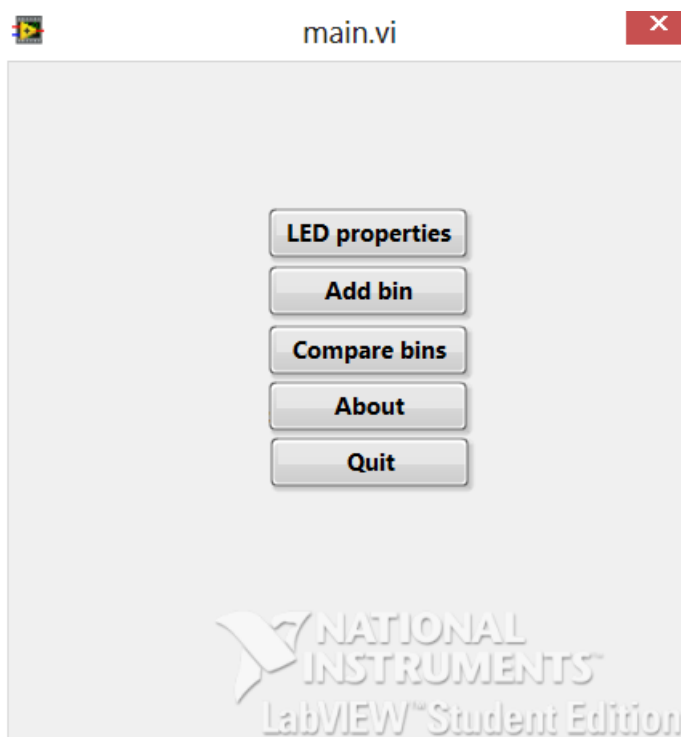
This software was developed as part of diploma thesis of Patrik Hanulák. It was developed in LabVIEW development platform. This guide is for regular user, that is using this software. For complete software documentation, contact creator of this software Mr. Patrik Hanulak via e-mail ([patrik.hanulak@gmail.com](mailto:patrik.hanulak@gmail.com)) or Mr. Jan Martoch, alternatively Mr. Petr Ferbas from company Varroc Lighting system.

There are basic user information included in this user guide. You should complete every task when following this guide. Guide is written as it is and is written for the version of software written in the top.

Software consists from 4 basic modules.

### **Main menu**

Top level menu is built from five buttons: **LED Properties**, **Add bin**, **Compare bins**, **About** and **Quit**, as shown in Fig. 1:



*Figure 2: Main menu panel*

Buttons **LED Properties**, **Add bins** and **Compare bins** runs separate modules. **About** button shows quick license agreement and basic information about software. **Quit** button ends the program.

## LED properties

This module is used for identifying LED and showing its basic properties. Module is shown in Figure 2:

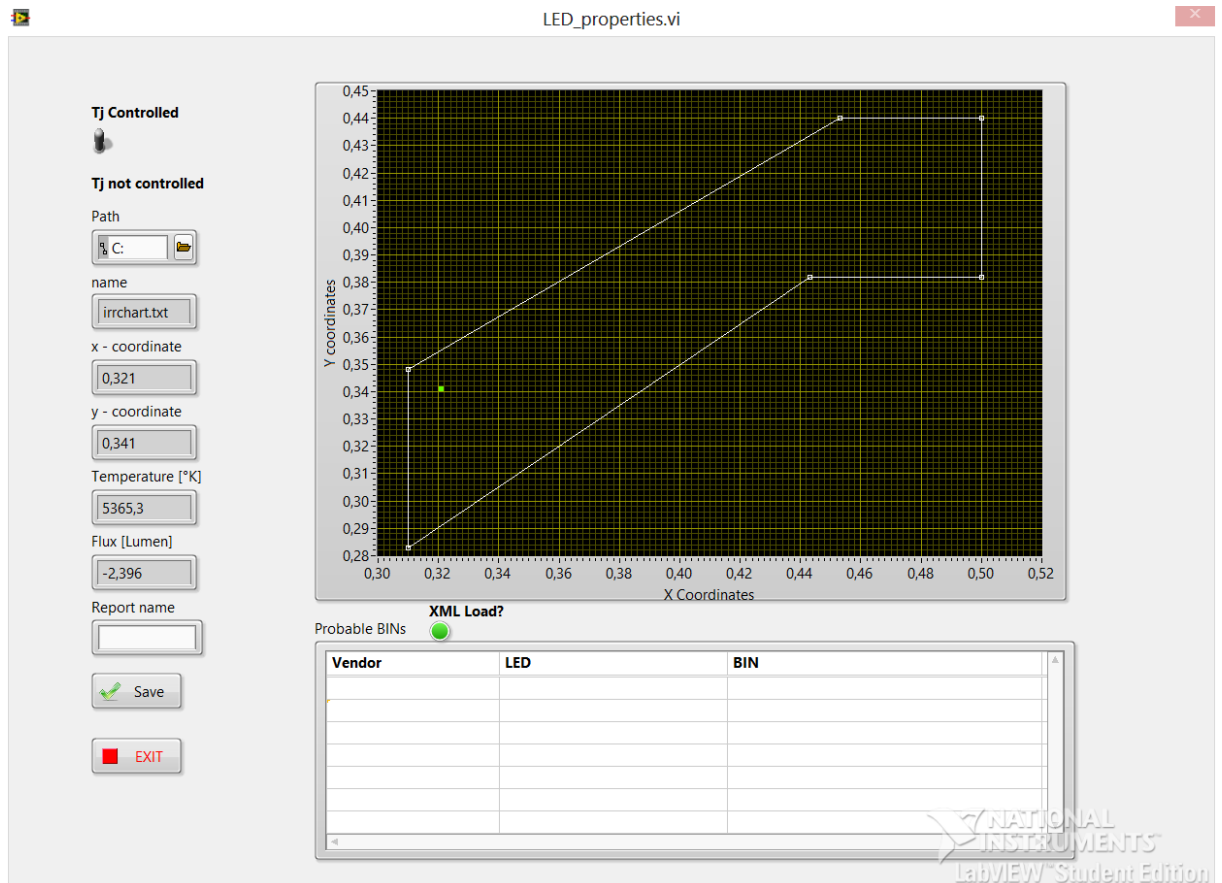


Figure 3: LED properties panel

For identifying LED and its properties, follow these steps:

1. Choose if the junction temperature  $T_j$  is controlled or not.
2. Choose the **Path** of an .irr file, that was produced by spectrometer.
3. If you want to save a report about LED and its probable binning, fill the text field **Report name** and click the **Save** button. Report will be generated and saved in software installation folder (usually in Program Files). Software installation folder may vary depending on your installation and operating system. Report is saved as JPEG picture with 32-bit color depth, e.g. MyLED.jpg.
4. If you don't want to save a report, click the **Exit** button.

---

Description of each element on the panel:

- **Path** – control for choosing an .irr file
- **Name** – name of the .irr file
- **x-coordinate** – x-coordinate of color emitted by LED in CIE xy system
- **y-coordinate** – y-coordinate of color emitted by LED in CIE xy system
- **Temperature** – color temperature in Kelvins
- **Flux** – luminous flux in Lumens
- **Probable bins** – bins that LED should suit for. It is necessary to keep in mind that LED vendors always mention a tolerance of binning (usually 0.01). If you don't use cooler or heat sink when you measure LED, you should also keep in mind that the color coordinates are dependent on junction temperature  $T_j$ .
- **XML load?** – indicates, if xml database was loaded successfully. If the indicator is red, check if the file **bindatabase.xml** is situated in program installation folder.
- **T<sub>j</sub> controlled / T<sub>j</sub> not controlled** – switch defining if the  $T_j$  is controlled and set as written in LED's datasheet or not. In case the  $T_j$  is not controlled, program reduces value of x-coordinates by 0,011 and y-coordinates by 0,018.

---

## Add bin

This module is designed to create XML file by adding basic information about LED bins. Interface of this module is shown in Figure 3:

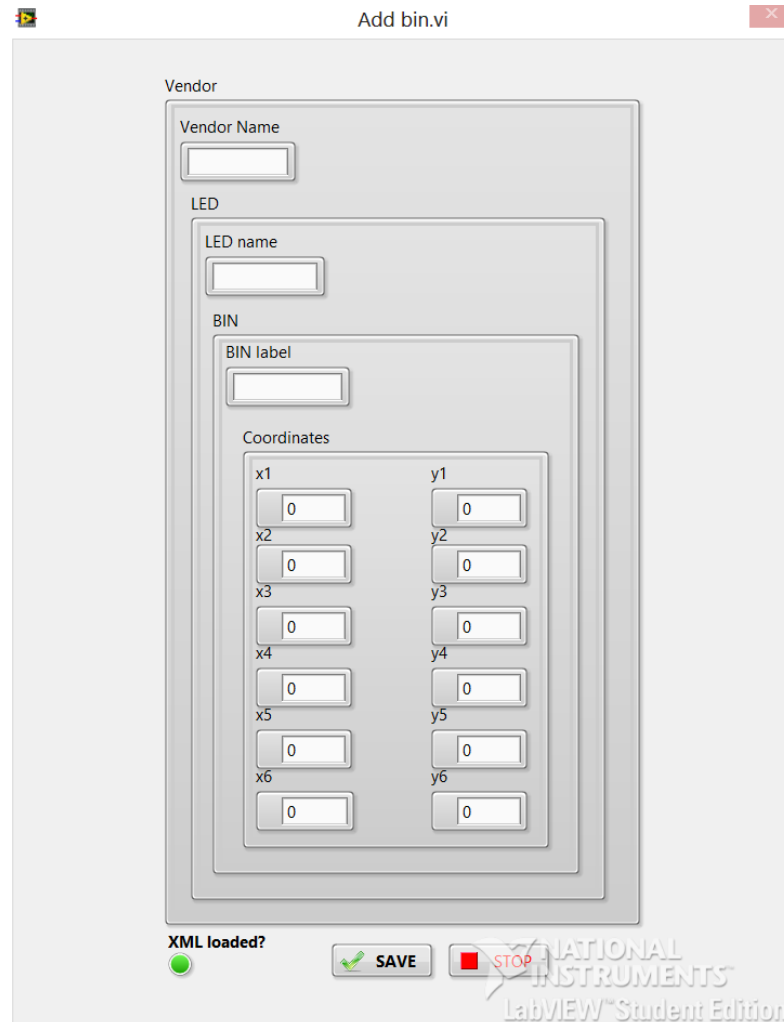


Figure 4: Add bin panel

For using this module, please, follow these instructions:

1. Open LED datasheet. Datasheets can be found on vendor's official web pages.
2. Find information about color bins.
3. Fill the form. It doesn't matter on order of bins. Please, **DO NOT** fill duplicate coordinates.
4. After filing the form, click **SAVE** button.
5. Repeat steps 2 – 4.
6. When finished, click the **STOP** button. All changes will be write to **bindatabase.xml** file physically. Program has autosave function, that saves the XML file after one minute of your inactivity.

Front panel's elements:

- **Vendor name** – e.g. Nichia, Philips, Osram etc.

- 
- **LED name** – Name of LED, eg. Z5, Luxeon rebel, LUW G6AP etc.
  - **BIN label** – Label of the bin, e.g. A0, JM, etc.
  - **Coordinates** – coordinates of bin. Bins are usually built from 4 points. In case the bin is defined by more than 6 points, please, try to approximate it to 6 points only.
  - **XML loaded?** - indicates, if xml database was loaded successfully. If the indicator is red, check if the file **bindatabase.xml** is situated in program installation folder.

Module doesn't save duplicities into xml file. Each bin is written into file only once.



---

## Compare bins

This module finds a similar bin according to user's choice. You have to choose Vendor, LED, bin and area match. User interface is shown in Figure 4:

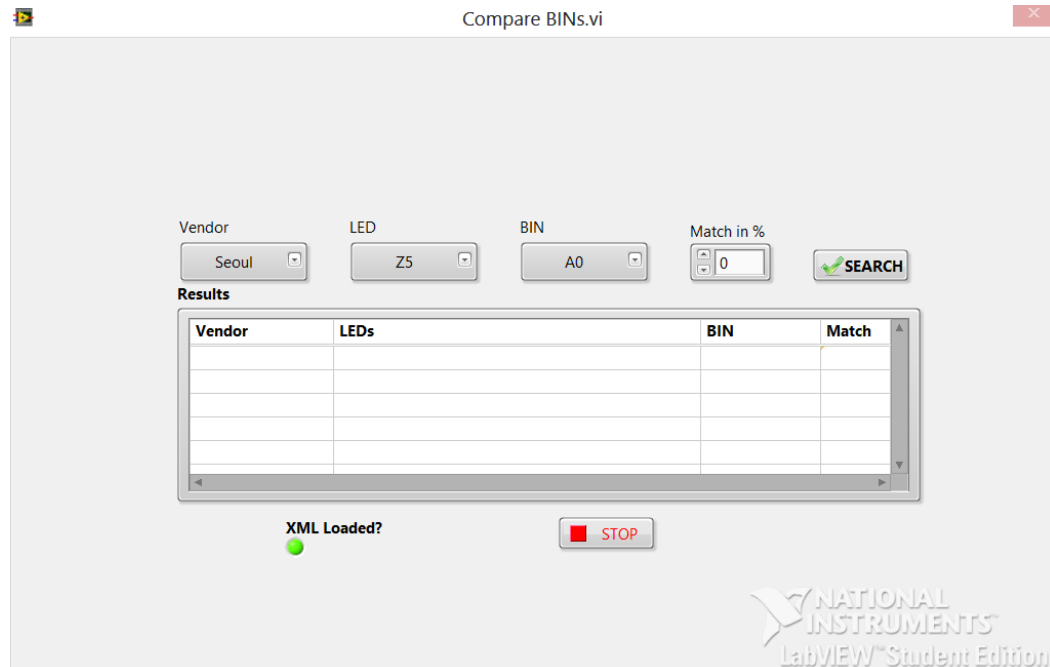


Figure 5: Compare bins panel

For using Compare bins module, please, follow these steps:

1. Select **Vendor**, **LED**, and **Bin** from pull-down menu.
2. Set **Match in %** control. This control sets the match of searched are in selected bin's area.
3. Click the **SEARCH** button.
4. Results are shown in table.
5. When search is finished, click **STOP** button.

It is possible to export results from table by selecting the rows and columns in table and right-clicking into the table.

This module is taking information from **bindatabase.xml** file.

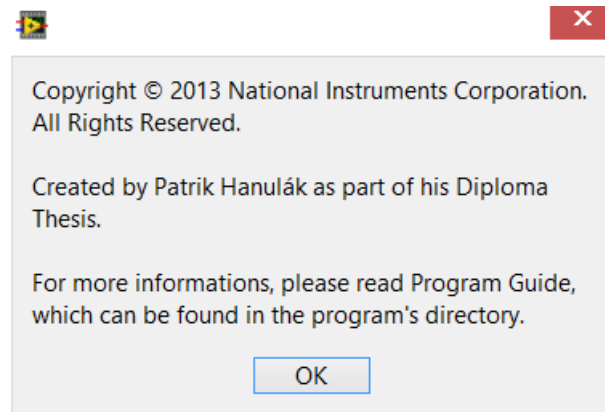
Front panel's elements:

- **Vendor**, **LED** and **Bin** – pull-down menu, click for choose wanted element.
- **Match in %** - defines what area of searched bin should match with bin given by user
- **XML loaded?** - indicates, if xml database was loaded successfully. If the indicator is red, check if the file **bindatabase.xml** is situated in program installation folder.
- **Results** – shows found bins.

---

## About

This part of the software is only informational. It is one-button dialog, informing the user about copyrights agreement and author of the software, as shown in Figure 5:



*Figure 6: About dialog*

## Quit

This button ends the instantiation of the whole software.

### **Software documentation for Bin analyzer**

This guide presents complete software documentation. As the code in LabVIEW is represented by data flow, there is no need to describe flowcharts. Code is can be easily read by following lines and this software documentation

Software consists of three basic modules. These modules are **LED properties**, **Add bin** and **Compare bins**. Function of each module and guideline how to use them is content of User Guide document.

### **About software**

This software was developed by Patrik Hanulák as part of his diploma solution. It was created for Varroc Lighting System company. It was built in LabVIEW 2012 Student Edition platform.

### **Bindatabase.xml**

The most important file of the software is bindatabase.xml file. This file is used in every module of software. It contains database of LED coordinates. It is created by user via **Add bin** module. Structure of the XML document is following:

```
<xml>
  <Vendor>
    <Vendor_Name></Vendor_Name>
    <BIN>
      <BIN_label></BIN_label>
      <Coordinates>
        <x1></x1>
        <x2></x2>
        <x3></x3>
        <x4></x4>
        <y1></y1>
        <y2></y2>
        <y3></y3>
        <y4></y4>
      </Coordinates>
      <LED>
        <LED_name></LED_name>
      </LED>
    </BIN>
  </Vendor>
</xml>
```

As seen on structure example, XML is created for future use in any other applications. File structure was validated by W3C XML standards. File is situated in software installation folder.

---

## LED properties

This module is created to work with output file from AVANTES AvaSpec-2048 irradiation measurement file (.irr file). Please, refer to the Recommendation for Chromatic Coordinates measurement for details how to get this file. As the first step when module is started, bindatabase.xml is loaded. Afterwards, whole code runs in a while loop.

Module is using **read\_file** subVI that is searching in the whole document for specified set of characters and reading specified number of characters after finding a match. As input of this subVI path to \*.irr file is required. Outputs are x-coordinate, y-coordinate, luminous flux and color temperature.

Graph used in LED properties module is XY Graph, which shows area of white color defined by international standards and position of light's color emitted by LED. White color area coordinates are obtained from global variable.

Report is generated as JPEG image with 32 bit color depth. Name of the file is obtained from **Report name** indicator. Report file is situated in software installation folder.

Table **Probable bins** is filled by the software automatically after the \*.irr file is loaded. MSXML parser loads all bins and their coordinates from bindatabase.xml file. After that, points are ordered by **Order points** subVI. This subVI order points and allows creating polygon from these points, so it does not matter how are coordinates stored in XML file. Afterwards, coordinates from \*.irr are being checked whether they lay inside, outside or on the bounds of bin. If they are situated inside or on the bounds of polygon, they are stored in shift register. After checking all bins, results are tested for duplicities and Vendor and LED name are assigned to the bin label. The complete information is then send to the table and shown to the user.

Whole module is event driven, so it does not consume memory and CPU time when inactive. There are 4 events that are controlling module.

First and default event is triggered by change of **Path** value, **x-coordinate** value or **y-coordinate** value. Reading \*.irr file, and showing all results happens in this event. Event Timeout is set to 100 milliseconds and nothing happens in case the timer is reached. It is used to not to consume memory and CPU time, when module is running but user is not making any actions. Third event is triggered by pressing **SAVE** button and saves report to JPEG file. As result, screen of front panel is saved. Last event is used when stopping programs and reads value of **Stop** button. As its value change, Boolean function is sent to loop and whole loop is stopped.

Switich **Tj controlled** / **Tj not controlled** adjusts color coordinates to compensate chromatic coordinates shift caused by uncontrolled temperature of P-N junction.

---

## Add bin

Module is used to fill bindatabase.xml file by user. It uses MSXML parser. Module runs in a while loop until user don't press **STOP** button. Module is event-driven. It has two events. Default event is triggered by pressing the **SAVE** button. Second event is triggered by timeout or by pressing **STOP** button.

After the module starts, bindatabase.xml file is loaded into program memory. Availability of the bindatabase.xml file is also checked. In case the file is missing or invalid, user is warned by one-button dialog window.

If the file is found and valid, program is waiting for filling the form by user and pressing the **SAVE** button. All changes are written only to the program memory and are NOT physically written to file situated on hard drive. For details, refer to Figure 1:

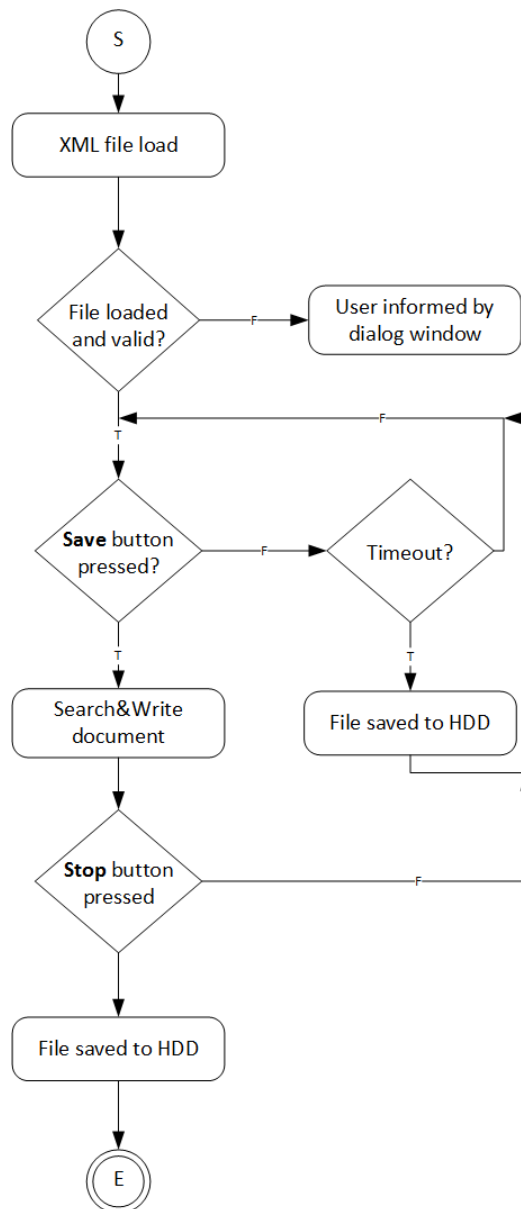


Figure 1: Add bin flow diagram

---

After pressing the **SAVE** button, following steps are done:

1. Form is checked if all fields are filled correctly. In case fields **Vendor name**, **LED name** or **Bin label** are empty, user is warned by one-button dialog and program waits for another pressing of the **SAVE** button.
2. When form is filled correctly, program adjust the inputs form the fields to prevent duplicities in xml file as following:
  - **Vendor name** is adjusted so it starts with capital letter. It is used for preventing duplicities, where e.g. “name” is already in xml document and user fill word “NaMe”.
  - **LED name** and **Bin label** are changed to upper case (e.g. ABCD, X1 etc.).
  - **Empty coordinates** are discarded, so they are not written into xml file as empty tags.
3. When all conditions are fulfilled, and user press the **Save** button, program checks, if **Vendor name** from form is already situated in xml file.
4. In case it isn't, program saves whole structure (vendor name, LED name, bin label, coordinates) beginning and ending with <Vendor> tag into XML structure and waits for another iteration.
5. If the vendor name is already situated in the xml file, program sets position in xml file according to vendor and searches for bin labels in XML file and compares it with bin label from form.
6. In case the bin label is not situated in the xml file, program writes the rest of the form (LED name, Bin label, coordinates) in the file structure beginning and ending with <BIN> tag.
7. In case the bin label given by the user is already in the xml file, program sets position in the xml file according to bin label from the form and searches for the LED names.
8. In case the LED name is found, program doesn't save anything into the xml file.
9. In case the LED name is not found, program writes new LED name in the correct position.

These steps protect creating duplicities and raise of file size on the disk.

File is physically saved into bindatabase.xml file situated on the hard drive after the one minute of user's inactivity or after pressing the **EXIT** button. User is informed that the file was correctly saved by the one-button dialog window. Better illustration how the adding of records into xml file works is shown in Figure 2.

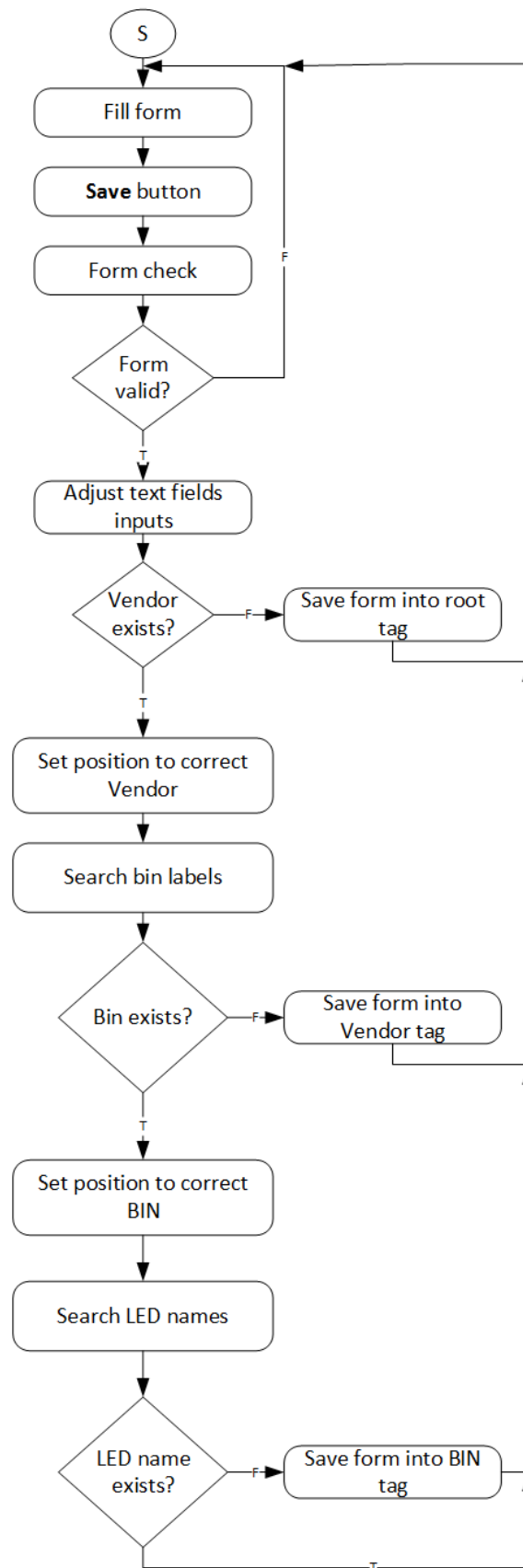


Figure 2: Adding record to XML structure

---

## Compare bins

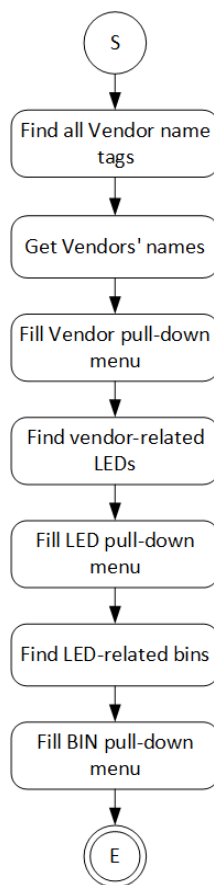
Module is used for comparing bin given by user to all bins in database. Comparison is conditioned by matching area that is set by user. Module is using MSXML toolkit. If XML file is not loaded properly, user is warned by one-button dialog message and is not allowed to continue with work of this module.

For specifying bin by user, pull-down menu is used. After clicking on the **Search** button, XML file is searched and results are shown in a table. Program is event-driven. In case the user inactivity, programs waits for it. This system of events doesn't consume RAM and CPU time. As the user clicks any button or pull-down menu, program makes one iteration.

After the module starts, XML file is loaded and one iteration of the program is done. This iteration fills up the pull-down menus. After the user chooses Vendor, LED, bin, sets the area match and click the **Search** button, program find selected bin and go through every bin in the database. Each bin is compared with the selected bin – coordinates are ordered, intersections of polygons are found and area of final polygon is calculated.

Matching area is related to selected bins. It means that if the area of searched bin is inside the user-selected bin, match is 100%.

Pull-down menus are fed from XML file. System of pull-down menu feeding is shown in Figure 3:



*Figure 7: Pull-down menu feeding*



Comparing of the bins is shown in Figure 4:

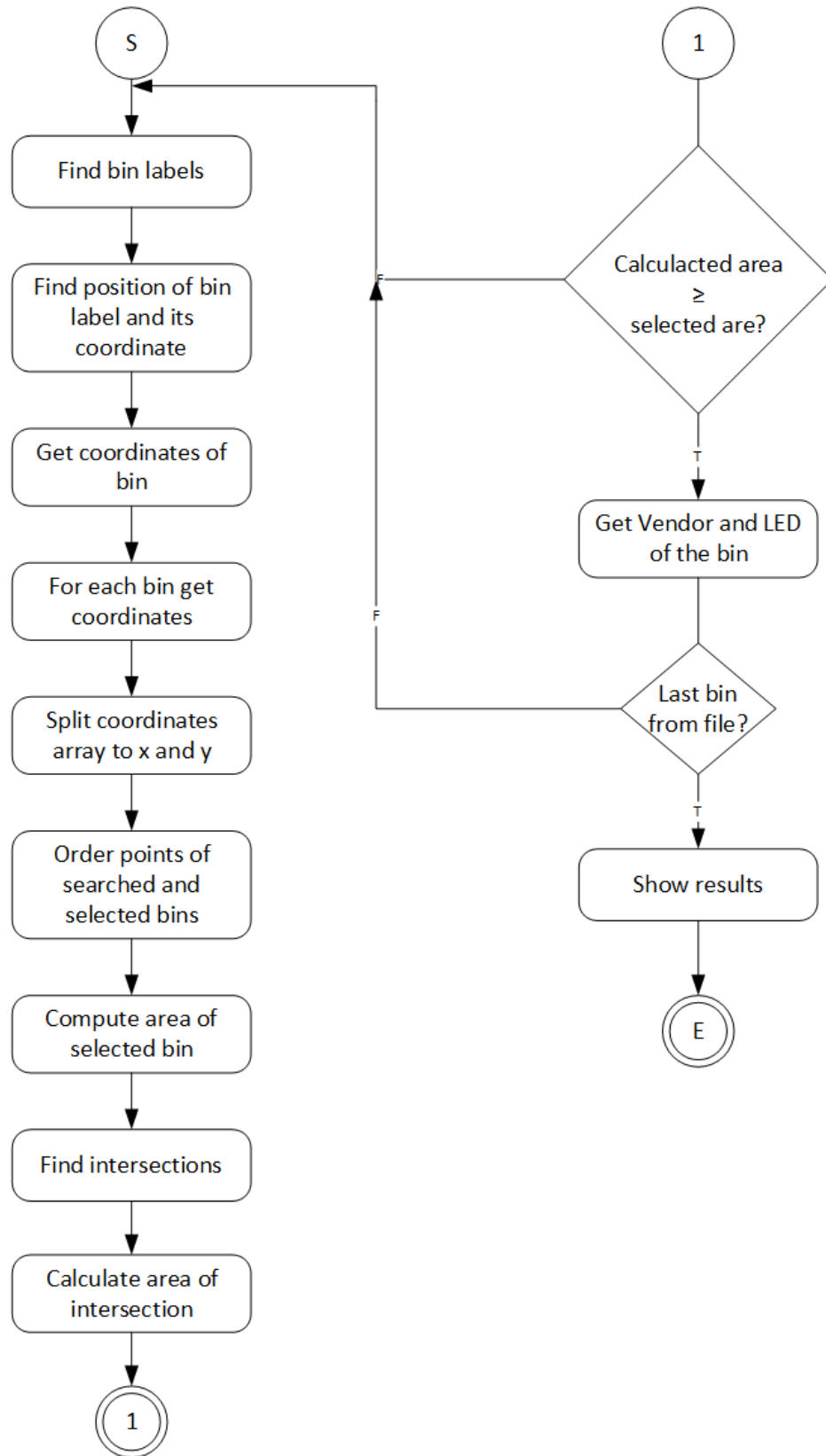


Figure 8: Process of comparing bins

---

## MSXML toolkit

LabVIEW default XML format is not suitable for using in other applications. Its structure is complicated and is useful when it is used only within LabVIEW.

MSXML toolkit is open-source tool for working with XML in LabVIEW. It allows creating XML in custom format that is suitable for using in other applications. This toolkit was replaced by LibXML toolkit, but its implementation does not work with LabVIEW 2012 properly. It contains basic functions for XML work.

This toolkit should be situated in LabVIEW's Program file folder in user.lib folder as folder named MSXML\_Custom (e.g. C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 2012\user.lib\MSXML\_Custom). Toolkit is developed under LGPL license.

For more information please refer to the developer's page:

<http://labxml.sourceforge.net/>

## Open issues

- For a future work, direct implementation of spectrometer to the software should be useful
- In **Compare bins** module, selected bin is shown with 100% match
- In **LED properties** module all shown bins are only probable because of toleration from vendors' datasheets. For more accurate results this issue should be solved
- In **Add bin** module list of already saved bins should be included, so the user should know which bins and LEDs are already included in database
- bindatabase.xml file should be synchronized with network storage, so all users across company network have the latest and updated version of database file

## Conclusion

This software documentation is supplementary to code comments. For closer information follow Context help in LabVIEW and see comments in VIs and subVIs.

In case of any questions feel free to contact developer Patrik Hanulák via e-mail [patrik.hanulak@gmail.com](mailto:patrik.hanulak@gmail.com).